

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:

**“CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DEL CENTRO
HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA
MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS”**

*Proyecto de tesis previo a la
obtención del título de
Ingeniero Civil*

AUTORES:

*Juan Fernando Avilés Tapia
Bryan Iván Barzallo Urgilés*

DIRECTOR:

Ing. Alfredo Vázquez López, M. Sc.

CUENCA - ECUADOR
2016

RESUMEN

Uno de los desafíos más grandes a los que se enfrenta la Ingeniería Civil, frente a la imperiosa necesidad de construir obras de todo tipo y tamaños para diferentes funcionalidades, es asegurar el diseño y construcción de dichas obras en suelos lo suficientemente estables y resistentes, considerando que toda obra civil necesita realizarse sobre un terreno firme, que brinde las características físicas y mecánicas necesarias para que se pueda edificar en el lugar en el que se requiera.

Con este objetivo, la caracterización de un suelo es imprescindible, pues nos permite determinar los parámetros geotécnicos de un terreno sobre el cual se cimentará la edificación a construir.

En los últimos años se han implementado métodos geofísicos, que han ayudado a efectuar este tipo de estudios de una manera más rápida, con resultados más exactos, y en menor tiempo. En países en vías de desarrollo como el Ecuador, han tomado más fuerza últimamente, sin embargo, muchos de los constructores del país siguen utilizando métodos invasivos, que combinados con ensayos de laboratorio, pueden obtener los parámetros geotécnicos de un suelo, pero en más tiempo, y más representativo económicamente.

Lo que este proyecto de titulación pretende realizar, es una caracterización geotécnica de tres lugares que forman parte del centro histórico de la ciudad de Cuenca, mediante prospección geofísica con análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y refracción sísmica. Teniendo en consideración las características geológicas locales de los materiales que se pueden encontrar en esta parte de la ciudad, nos permite establecer una comparación detallada entre los resultados que se han obtenido mediante la utilización de estos métodos modernos, con estudios anteriormente efectuados utilizando métodos geotécnicos tradicionales, y así establecer la validez y la exactitud de la geofísica y la sísmica de refracción, a la hora de caracterizar un suelo de diferentes propiedades.

Al poder sentar las bases para la utilización de estos métodos modernos en el análisis de suelos de todo tipo, nuestro anhelo, es fomentar a los profesionales y estudiantes de Ingeniería dedicados a la construcción e investigación en este extenso campo de la Mecánica de Suelos, a seguirlo utilizando con el fin de difundirlo a nivel nacional.

PALABRAS CLAVE:

Geofísica, caracterización de suelos, MASW, refracción sísmica, prospección geofísica, centro histórico, capacidad admisible, parámetros geotécnicos.

ABSTRACT

One of the greatest challenges Civil Engineering has to face, with the urgent need for building works of all types and sizes for different functions, is to ensure the design and construction of such works on sufficiently stable terrain, considering that every civil work needs to be done on solid ground, to provide the necessary physical and mechanical characteristics so that building can be done on in the place where required.

With this objective, the characterization of ground is essential, because it allows us to determine the geotechnical parameters of land on which the building will be built.

In recent years, geophysical methods have been implemented, which have helped to make such studies in a faster way, with more accurate results in a shorter period of time. In developing countries such as Ecuador, these methods have become more popular recently; however, many of the builders in the country continue to use invasive methods, which combined with laboratory tests, can obtain geotechnical parameters of a type of soil, but in a longer period of time and for a higher amount of money.

What this thesis project aims, is a geotechnical characterization of three places that are part of the Historic Center of Cuenca, by means of geophysical prospecting with multichannel analysis superficial of waves and seismic refraction. Taking into account the local geological characteristics of the materials that can be found in this part of the city, allows us to establish a detailed comparison between the obtained results using these modern methods with traditional studies previously conducted using geotechnical methods. Thus, we can establish the validity and accuracy of geophysical and seismic refraction when characterizing the different properties of land.

Being able to establish the foundation for the use of these modern methods in the analysis of all types of soils, our aim is to encourage professionals and students engaged in construction engineering and research in this broad field of Soil Mechanics, to continue using it in order to spread in the country.

KEY WORDS:

Geophysics, soils characterization, MASW, seismic refraction, geophysical prospecting, historical center, admissible capacity, geotechnical parameters.

CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	17
1.1. Introducción	17
1.2. Justificación.....	18
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
2. MARCO TEORICO	19
2.1. Caracterización de Suelos	19
2.1.1. Caracterización mediante pruebas mecánicas convencionales.....	19
2.1.2. Caracterización mediante pruebas geofísicas modernas	25
2.2. Geofísica	25
2.2.1. División de la Geofísica	25
2.2.2. Prospección de la Geofísica	26
2.2.2.1. Métodos Eléctricos.....	26
2.2.2.2. Método Gravimétrico.....	27
2.2.2.3. Método Magnético	27
2.2.2.4. Métodos Sísmicos	27
2.2.3. Ondas Sísmicas	28
2.2.3.1. Elementos de una Onda	28
2.2.3.2. Tipos de Ondas Sísmicas	29
2.2.4. Principios y leyes que rigen las ondas.....	33
2.2.5. Factores que afectan la propagación de las ondas.....	34
2.2.6. Parámetros que afectan la velocidad de las ondas	35
2.3. Métodos Sísmicos.....	36
2.3.1. Métodos Sísmicos Invasivos	36
2.3.1.1. Up-Hole	36
2.3.1.2. Down-Hole	37
2.3.1.3. Cross-Hole	39
2.3.2. Métodos Sísmicos No Invasivos.....	40
2.3.2.1. Mediante ondas de cuerpo (Vs y Vp).	41
2.3.2.1.1 Reflexión Sísmica	41
2.3.2.1.2 Refracción Sísmica.....	42
2.3.2.2. Mediante ondas superficiales (Rayleigh)	43
2.3.2.3. SSRM	44
2.3.2.4. SASW	46
2.3.2.5. MASW	50
2.3.2.6. ReMi:	51
2.3.2.7. ESAC	52



3. METODOLOGÍA	56
3.1. Generalidades	56
3.1.1. Equipo utilizado	57
3.2. Área de estudio	57
3.3. Recopilación de información de estudios geotécnicos realizados en el centro histórico de la ciudad de Cuenca que corresponden a las líneas de estudio	62
3.3.1. Línea 1 (Borrero y Pío Bravo)	63
3.3.2. Línea 2 (Padre Aguirre y Presidente Córdova)	63
3.3.2.1. Estudio del Suelo de Fundación	63
3.3.3. Línea 3 (Colegio Manuel J. Calle)	64
3.3.3.1. Estudio del Suelo de Fundación	64
3.4. Descripción de los ensayos en campo	65
3.5. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	67
3.5.1. Determinación de las velocidades V_p	67
3.5.2. Determinación de las velocidades V_s	69
3.5.3. Combinación de Técnicas	70
3.6. Determinación de Parámetros Geotécnicos.	73
3.7. Análisis de Capacidad Carga	75
3.8. Análisis de Asentamientos Elásticos.	77
3.9. Procedimiento propuesto para el análisis de capacidad carga y Asentamientos Elásticos.	81
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
4.1. Parámetros geotécnicos obtenidos en la investigación para el diseño de edificaciones del centro histórico de cuenca	83
4.2. Velocidades de ondas sísmicas V_s y V_P	84
4.3. Parámetros Geotécnicos obtenidos mediante la Geofísica	85
4.4. Análisis y Comparación	87
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXOS	92
A. Planos de ubicación de líneas donde se realizaron las pruebas geofísicas	¡Error! Marcador no definido.93
B. Plan de ensayos de laboratorio y resultados obtenidos (Ing. Franklin Ordoñez)	948
C. Factores de Capacidad de carga	101
D. Factores de Forma, Profundidad e Inclinación recomendadas para usarse en el cálculo de la capacidad de carga admisible	102
E. Factores de Forma (Steinbrenner, 1934) para el cálculo de asentamientos elásticos.	103
F. Factores de profundidad (Fox, 1948) para el cálculo de asentamiento elásticos	100
G. Domocrónicas de cada línea de estudio con el método de Refracción Sísmica.	104
H. Reportes MASW de cada línea de estudio con los métodos MASW, ReMi, ESAC	107
I. Registro Fotográfico	163
J. Hojas de Campo	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Equipo para el ensayo de corte directo	20
Figura 2.2. Equipo para el ensayo de compresión triaxial (Rodas & Torres, 2012).	21
Figura 2.3. Esquema del ensayo de penetración estándar (SPT) (Devincenzi & Frank, 2004).	24
Figura 2.4. Elementos de una onda.	29
Figura 2.5. Ondas Primarias "P" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES-).	30
Figura 2.6. Ondas Secundarias "S" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES-).	31
Figura 2.7. Ondas Love "L" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES-).	31
Figura 2.8. Ondas Rayleigh "R" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES-).	32
Figura 2.9. Diagrama de reflexión y refracción, Ley de Snell.	34
Figura 2.10. Esquema del ensayo Up-Hole (Gonzales, 2011).	37
Figura 2.11. Esquema del ensayo Down-Hole (BASALTO IT).	38
Figura 2.12. Esquema del ensayo Cross-Hole (AIG Instrumentos).	39
Figura 2.13. Esquema de ensayos de refracción y reflexión sísmica (Guarachi, 2013).	42
Figura 2.14. Método Steady State Rayleigh (SSRM) (Ochoa, 2007).	45
Figura 2.15. Dispersión de las ondas Rayleigh dependiendo de la longitud de onda (Correia, 2015).	47
Figura 2.16. Arreglo de eje de simetría, método SASW (Ochoa F., 2007).	48
Figura 2.17. Arreglo de fuente común, método SASW (Ochoa F., 2007).	48
Figura 2.18. Esquema de Ensayo MASW.(ParkSeismic)	50
Figura 2.19. Comparación entre datos medidos con método ESAC y curvas de dispersión teóricas para dos modos de vibrar de la onda Rayleigh, a partir de velocidades de onda conocidas por ensayo PS-logging en el mismo sitio (Ohoi, M., A. Nobata, and K. Wakamatsu, 2002)	54
Figura 3.1. Equipo utilizado para la recopilación de información geofísica y sísmica	57
Figura 3.2. Mapa de ubicación de la zona del proyecto: a) Provincia del Azuay, b) Cantón Cuenca, c) Clasificación Parroquial.	58
Figura 3.3. Configuración para la ejecución de ensayos activos (MASW y Refracción Sísmica), Línea 3	65
Figura 3.4. Configuración para la ejecución del ensayo ReMi. Línea 3	66
Figura 3.5. Configuración para la ejecución del ensayo ESAC. Línea 1	67
Figura 3.6. Detección de los primeros arribos del registro sísmico para el primer shot, Línea 3	68
Figura 3.7. Curvas tiempo-distancia "Domocrónicas", Línea 3.	68
Figura 3.8. Sismogramas: a) MASW, b) ReMi, c) ESAC.	70
Figura 3.9. Curvas de dispersión, a) MASW, B) ReMi, c) ESAC.	70
Figura 3.10. Combinación de curvas de dispersión.	71
Figura 3.11. Curva de dispersión ajustada para la línea 3.	72
Figura 3.12. Perfil de Vs para la línea 3.	73
Figura 3.13. Asentamientos elásticos de cimentaciones rígidas y flexibles.	77
Figura 3.14. Variación del factor de influencia y Modulo de Young con la profundidad	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos	30
Tabla 2.2. Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas.	33
Tabla 2.3. Resultados de mediciones de velocidad de onda y densidad realizados en un sondeo para estudiar en método ESAC (Otori et al., 2002)	53
Tabla 3.1. Ubicación, geología y litología de las 3 líneas de estudio.	59
Tabla 3.2 Fórmulas empíricas para determinar el Módulo de Young estático (Aguay & Dranichnikov, 2015)	74
Tabla 3.3. Factores de seguridad para suelos y rocas	75
Tabla 4.1. Parámetros geotécnicos obtenidos en base a métodos convencionales.	83
Tabla 4.2. Capacidad de carga admisible en KN/m ² obtenido mediante la ecuación de Terzagui. (1943).	83
Tabla 4.3. Velocidades de compresión (V_p)	84
Tabla 4.4. Velocidades de corte (V_s)	84
Tabla 4.5. Parámetros geotécnicos dinámicos obtenidos en las tres líneas de estudio	85
Tabla 4.6. Parámetros geotécnicos Estáticos mediante expresiones empíricas.	86
Tabla 4.7. Capacidad de carga admisible según Tezcan et al (2006) y valores propuestos de c y ϕ .	86

SIMBOLOGIA

\emptyset	Ángulo de fricción interna.
c	Cohesión
σ	Esfuerzo total normal sobre el plano de falla
σ_1	Presión normal o axial.
σ_2, σ_3	Presión Lateral
N	Número de golpes/capas
A	Amplitud de vibración
T	Periodo de vibración del suelo
f	Frecuencia
λ	Longitud de onda
V	Velocidad de onda
k	Numero de onda
P	Onda Primaria, longitudinal o de Compresión
S	Ondas Secundaria, Transversal o de Corte
V_P	Velocidad de ondas de compresión
V_S	Velocidad de ondas de corte
V_R	Velocidad de fase de ondas Rayleigh
n	Índice de refracción
i	Angulo incidente
r	Angulo de refracción
q_a	Capacidad Carga Admisible
γ	Peso Específico del Suelo
n	Factor de Seguridad
β	Factor de Corrección



K_s	Coeficiente de Basalto dinámico
G	Módulo al Esfuerzo Cortante Dinámico
E_c	Módulo de Restricción Elástico Dinámico
E	Módulo de Elasticidad Dinámico
μ	Coeficiente de Poisson
Q_i	Asentamientos Inmediatos
B	Ancho de la Cimentación
L	Longitud de la Cimentación
I_p Inmediatos	Factor de Influencia en el análisis de Asentamientos
D_f	Desplante de Cimentación
q_n	Presión neta de Cimentación
q_u	Capacidad ultima de carga
N_c, N_q, N_γ	Factores de capacidad de carga
$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$	Factores de forma
$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$	Factores de profundidad
$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$	Factores de Inclinación



CLAUSULA DE RESPONSABILIDAD 1



Universidad de Cuenca

Yo, **Juan Fernando Avilés Tapia**, autor de la tesis “Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante Métodos Geofísicos”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 17 de febrero de 2016.

Juan Fernando Avilés Tapia

C.I. 0103626438



CLAUSULA DE RESPONSABILIDAD 2


Yo, **Bryan Iván Barzallo Urgilés**, autor de la tesis "Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante Métodos Geofísicos", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 17 de febrero de 2016.

Bryan Iván Barzallo Urgilés

C.I. 1900625862


CLAUSULA DE RECONOCIMIENTO 1



Universidad de Cuenca

Yo, **Juan Fernando Avilés Tapia**, autor de la tesis "Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante Métodos Geofísicos", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 17 de Febrero de 2016



Juan Fernando Avilés Tapia
C.I. 0103626438



CLAUSULA DE RECONOCIMIENTO 2

Yo, **Bryan Iván Barzalto Urgiles**, autor de la tesis "Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante Métodos Geofísicos", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 17 de Febrero de 2016

Bryan Iván Barzalto Urgiles

C.I. 1900625862

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más profundo agradecimiento al Ing. Alfredo Vázquez López (M. Sc), por su dirección y asesoramiento incondicional en la realización de este proyecto de tesis, así mismo al apoyo logístico de la empresa GEO & GEO, conjuntamente a quienes trabajan dentro de ella, a los Sres.: Xavier Palacios, Bryan Loja y Ángel Loja, que con su ayuda práctica y conocimientos, han sabido brindar el apoyo necesario para culminar este proyecto.

No queremos pasar por alto a todos los profesionales entrevistados, que han sido parte de este trabajo de titulación, y que han sabido impartirnos su experiencia y conocimientos, principalmente al Ing. Franklin Ordoñez, un agradecimiento especial.

Juan Fernando y Bryan



DEDICATORIA

A mí Dios, por haberme sostenido durante todos estos años de mi vida universitaria y que ha hecho posible que cumpla otro gran objetivo en mi vida.

A mis Padres Juan Alejandro y Jackie, por ser siempre mi guía, fortaleza, mis mayores ejemplos y mis mejores amigos.

A mi hermano Pablo, por demostrarme la importancia de ser honesto y diligente.

A todos mis amigos(a), que han sabido apoyarme de una u otra forma, y han demostrado ser más que amigos, hermanos.

A mis sobrinos, por ser mi mayor inspiración.

Juan Fernando



DEDICATORIA

Este proyecto dedico a mis padres, familia y amigos que apoyaron para hacer posible seguir y culminar esta carrera, siendo un ejemplo de superación y esfuerzo, inculcando principios y valores que me permitieron finalizar una de mis metas.

Bryan

1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El terreno sobre el cual se pretende desarrollar cualquier obra de ingeniería, será el que recibe la carga que transmite la estructura, por lo que es necesario comprobar los diseños de capacidad de carga de acuerdo a dos estados límites: bajo criterio de resistencia al corte y bajo criterio de asentamiento. Para ello es necesaria la recopilación de información sobre las condiciones del suelo, que sirva como herramienta al ingeniero para la determinación de parámetros tales como: la estratigrafía del sitio, compacidad del suelo de fundación, definición del tipo de cimentación a utilizar y su dimensionamiento, cota de fundación en la que se encuentra el suelo sano y firme, ubicación de yacimientos de rocas sanas y/o alteradas, determinación de fallas, determinación del nivel freático, etc., que permitirá establecer los criterios suficientes y necesarios con los cuales se diseñe correctamente excavaciones y cimentaciones para una obra civil.

Estos estudios en Ecuador, por lo general, se lo realiza en base al Ensayo de Compresión Triaxial, Ensayo de Corte directo, que consisten en obtener muestras inalteradas dentro de las perforaciones con ayuda del tubo de pared delgada y su posterior ensayo en laboratorio, y por el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) que es un *método semidirecto* realizado en el sitio con la ejecución de perforaciones arrojando resultados que deben ser obligatoriamente correlacionados y corregidos para su correcta interpretación.

Las edificaciones del centro histórico de la ciudad de Cuenca están asentadas en perfiles de terrazas glaciales que son suelos con alta heterogeneidad en los materiales, en donde la caracterización geotécnica es difícil, dado que la heterogeneidad de los depósitos nos impide tomar muestras inalteradas y presenta dificultades en las perforaciones. Las incertidumbres en esta caracterización puede tener graves efectos negativos sobre la viabilidad constructiva, funcionalidad o seguridad de los proyectos o llevar al sobre dimensionamiento de obras, todo lo cual implica sobrecostos importantes, por lo que es necesario recurrir a métodos alternativos de caracterización de suelos tales son los métodos basados en la geofísica.

En los últimos años en el Ecuador estos cálculos se están realizando en base a geofísica y más concretamente utilizando métodos sísmicos empleando ondas superficiales. Esta es una técnica no invasiva, en la cual se colocan sensores en la superficie del terreno para registrar la llegada de diversos tipos de ondas, y mediante diversos métodos de análisis se pueden obtener perfiles de variación de velocidad de onda de corte (V_s) a profundidad, permitiendo conocer las características físicas del terreno, determinar su capacidad portante y grado de compactación evitando perforaciones generalmente costosas. Dentro del ámbito de la geotecnia, estos métodos ha tenido gran protagonismo por la diversidad y naturaleza de los problemas que pueden ser resueltos.



1.2. Justificación

Este trabajo de titulación consistirá en la presentación de métodos geofísicos activos y pasivos, los cuales son: MASW, ReMi y ESAC, así como también un método basado en la sismica de refracción, como herramientas de gran valor para la Ingeniería Civil, cuyo uso en otros países ha logrado buenos resultados en la determinación de parámetros de diseño en obras civiles, y cuyo uso se pretende promover, debido a que en Cuenca-Ecuador aún existe poca difusión de ellos.

Además se realizarán varios ensayos geofísicos en distintas partes del centro histórico de la ciudad de Cuenca con el respaldo del Ing. Alfredo Vásquez López MSc. que dispone de suficiente experiencia y de los equipos necesarios para su ejecución en campo de la empresa a su cargo GEO&GEO.

Finalmente se pretende investigar datos referidos a los estudios geotécnicos realizados en esta zona de la ciudad para establecer una comparación entre los resultados obtenidos de los ensayos geofísicos y sismica de refracción con los resultados de los métodos geotécnicos tradicionales, para posteriormente dar recomendaciones y/o soluciones, además de dar a conocer un mayor entendimiento sobre los suelos constituidos a base de material heterogéneo, y suelos de alta expansión y baja resistencia, como los que se encuentran en el centro histórico de la ciudad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

El objetivo de este proyecto de titulación, consiste en establecer una caracterización geotécnica del suelo de tres líneas localizadas en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, mediante métodos de refracción sísmica, MASW, ReMi y ESAC.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Llevar a cabo una investigación de los estudios y criterios geotécnicos que fueron usados para la construcción de algunas obras civiles localizadas en el centro histórico de la ciudad de Cuenca.
- Determinar la capacidad portante del suelo del centro histórico en tres sitios, mediante métodos geofísicos.
- Con los resultados que se obtengan de esta caracterización, se realizará un análisis comparativo con los resultados que se obtuvieron mediante estudios geotécnicos tradicionales y se comprobará la validez y eficacia de los métodos geofísicos a la hora de caracterizar suelos de diferente tipo.

2. MARCO TEORICO

2.1. Caracterización de Suelos

Una correcta caracterización del subsuelo es uno de los principales factores que permite un diseño seguro y económico de la cimentación de las estructuras. Para conseguir esta caracterización, se deberá tener conocimiento del tipo de proyecto y la variabilidad de los estratos en el sitio de implantación de la estructura, al conocer esta variabilidad es posible determinar mediante métodos mecánicos convencionales y geofísicos, las propiedades particulares o peculiares del material sobre el cual se podrá asegurar un diseño correcto de la cimentación de la obra civil que se construirá.

Teniendo en cuenta lo que implica realizar una correcta caracterización del subsuelo, a continuación se expondrá de forma resumida las maneras convencionales y modernas de realizarlas.

2.1.1. Caracterización mediante pruebas mecánicas convencionales

La caracterización de suelos mediante pruebas mecánicas se lo puede realizar de diversas maneras, entre estos se pueden citar al ensayo de penetración estándar (SPT), el ensayo de penetración estática y piezocono (CPT y CPTU), el ensayo Vane-Test (FVT), así como algunos otros tipos de penetrómetros que se ejecutan en campo. También, en el laboratorio existe una serie de ensayos que usualmente se realizan como la resistencia a la compresión uniaxial, corte directo y compresión triaxial.

En nuestro país se puede decir que los ensayos más utilizados son: Ensayo de Compresión Uniaxial, Ensayo de Corte Directo, Ensayo de Compresión Triaxial y el Ensayo de Penetración Estándar.

➤ Ensayo de Corte Directo

Este ensayo consiste en colocar el espécimen en una caja de corte como se muestra en la figura 2.1, aplicando un esfuerzo normal determinado, humedeciendo o drenando el espécimen de ensayo, se consolida el espécimen bajo el esfuerzo normal, a una velocidad constante de deformación se hace desplazar un marco horizontalmente y se mide la fuerza de corte y los desplazamientos horizontales a medida que la muestra es llevada a la falla.

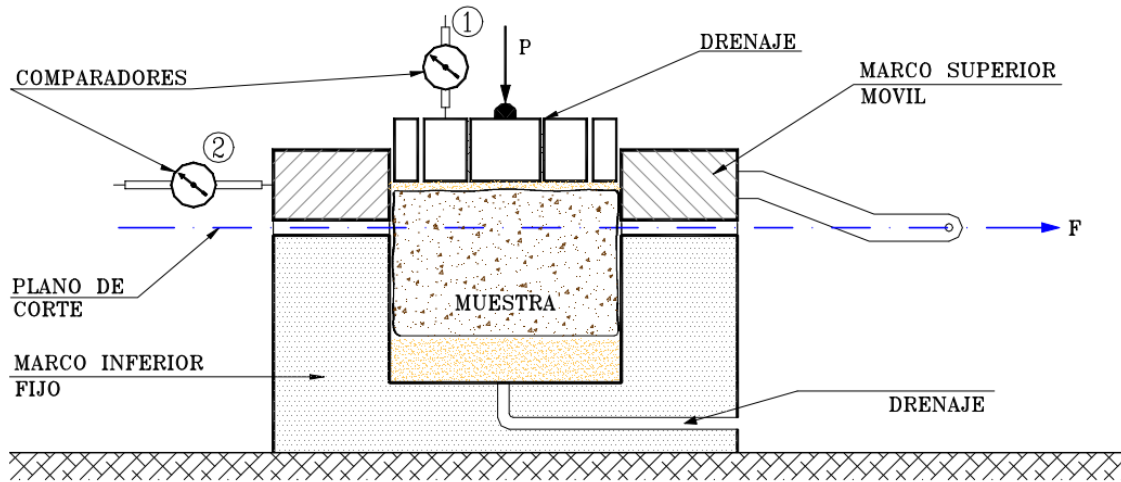


Figura 2.1. Equipo para el ensayo de corte directo

Generalmente se ensayan tres o más especímenes, cada uno bajo una carga normal diferente para determinar su efecto sobre la resistencia al corte y al desplazamiento y las propiedades de resistencia a partir de las envolventes de resistencia de Mohr, las que se grafican a partir de los esfuerzos normales y tangenciales resultantes en el momento de la falla o rotura de la muestra.

El ensayo de Corte Directo, es simple y económico de realizar pero presenta los inconvenientes del poco control que se tiene sobre las condiciones de drenaje, la dificultad para medir presiones de poro y algunos problemas inherentes a los mecanismos de las máquinas que realizan los ensayos (Rodas & Torres, 2012).

➤ **Ensayo de Compresión Triaxial**

El ensayo de compresión triaxial es el más versátil en el estudio de las propiedades esfuerzo-deformación además de obtener una gran variedad de estados reales de carga (Aguay & Dranichnikov, 2015).

El ensayo consiste en colocar un espécimen cilíndrico de suelo dentro de una membrana de látex dentro de una cámara a presión como se muestra en la figura 2.2. La parte superior e inferior de la muestra tiene discos porosos, los cuales se conectan al sistema de drenaje para saturar o drenar el espécimen. En estas pruebas se pueden variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre el espécimen de suelo, efectuando mediciones sobre sus características mecánicas en forma completa. Los especímenes usualmente están sujetos a presiones laterales de un líquido, generalmente agua.

De este ensayo se obtienen los esfuerzos principales mayor, intermedio y mínimo que son σ_1 , σ_2 y σ_3 respectivamente. En una prueba de compresión, la presión axial siempre es el esfuerzo principal mayor σ_1 ; los esfuerzos intermedios y menor son iguales a la presión lateral y son iguales entre si $\sigma_1 = \sigma_2$.

Realizando por lo menos 3 pruebas, con presiones laterales diferentes, en un gráfico se dibujan los círculos de Mohr que representan los esfuerzos de falla de cada muestra y trazando una tangente o envolvente a estos, se determinan los parámetros ángulo de fricción (ϕ) y cohesión C , del suelo para posteriormente determinar su capacidad admisible.

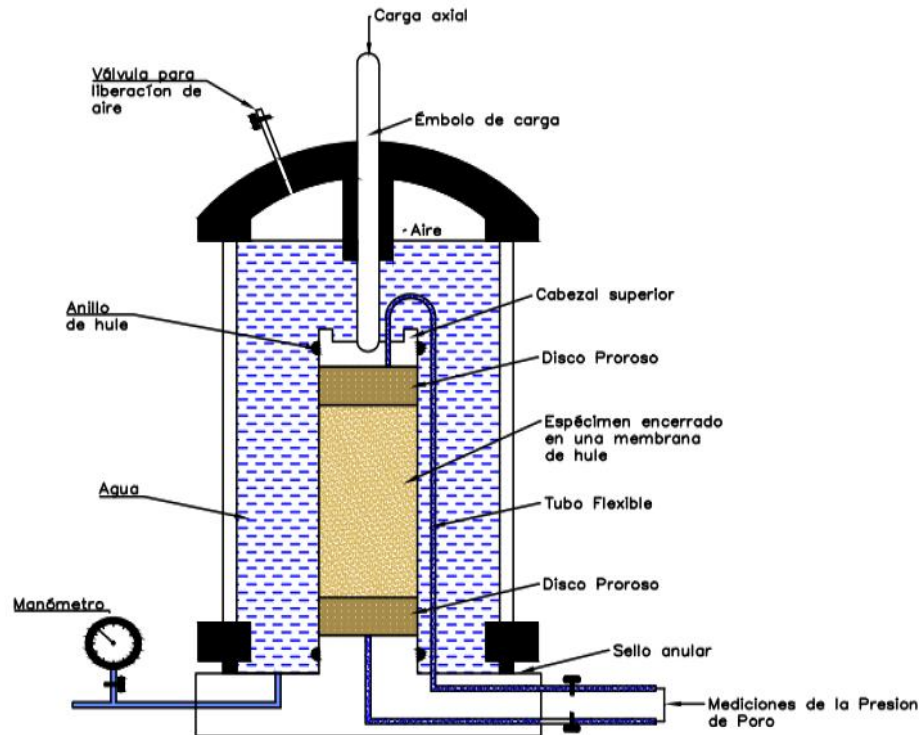


Figura 2.2. Equipo para el ensayo de compresión triaxial (Rodas & Torres, 2012).

Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones en que este trabajará, se tienen las siguientes alternativas para realizar el ensayo de compresión triaxial:

- **Prueba lenta - Prueba con consolidación y con drenaje (CD)**

La característica fundamental de la prueba es que los esfuerzos aplicados al espécimen son efectivos. Primeramente se aplica al suelo una presión hidrostática, manteniendo abierta la válvula de comunicación con la bureta y dejando transcurrir el tiempo necesario para que haya consolidación completa bajo la presión actuante. Cuando el equilibrio estático interno se haya restablecido, todas las fuerzas exteriores estarán actuando sobre la fase sólida del suelo, es decir, producen esfuerzos efectivos, en tanto que los esfuerzos neutrales en el agua corresponden a la condición hidrostática. La muestra se lleva a la falla a continuación aplicando la carga axial en pequeños incrementos, cada uno de los cuales se mantiene el tiempo necesario para que la presión en el agua, en exceso de la hidrostática, se reduzca a cero.

Los ensayos consolidados drenados se utilizan esencialmente en suelos granulares (arenas), sin embargo, se puede aplicar en suelos finos, pero los ensayos requieren tiempos prolongados del orden de semanas.

- **Prueba rápida – Prueba con consolidación y sin drenaje (CU)**

En este tipo de prueba, el espécimen se consolida primeramente bajo la presión hidrostática; así el esfuerzo llega a ser efectivo, actuando sobre la fase sólida del suelo. En seguida, la muestra se lleva a la falla por un rápido incremento de la carga axial, de manera que no se permita cambio de volumen. El hecho esencial de este tipo de prueba es el no permitir ninguna consolidación adicional durante el periodo de falla, de aplicación de la carga axial. Esto se logra fácilmente en una cámara de compresión triaxial cerrando la válvula de salida de las piedras porosas a la bureta.

En la segunda etapa de una prueba rápida consolidada podría pensarse que todo el esfuerzo desviador fuera tomado por el agua de los vacíos del suelo en forma de presión neutral, ello no ocurre así y se sabe que parte de esa presión axial es tomada por la fase sólida del suelo, sin que hasta la fecha, se hayan dilucidado por completo ni la distribución de esfuerzos, ni las razones que lo gobiernan. De hecho no hay ninguna razón en principio para que el esfuerzo desviador sea íntegramente tomado por el agua en forma de presión neutral, si la muestra estuviese lateralmente confinada, como el caso de una prueba de consolidación.

El ensayo CU (consolidado-no drenado) se realiza generalmente con medición de la presión de poros o neutra con el fin de determinar los parámetros de " C " y " φ " en términos de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos.

- **Prueba rápida - Prueba sin consolidación y sin drenaje (UU)**

En este tipo de prueba no se permite en ninguna etapa la consolidación de la muestra. La válvula de comunicación entre el espécimen y la bureta permanece siempre cerrada impidiendo el drenaje. En primer lugar, se aplica al espécimen una presión hidrostática y de inmediato, se falla el suelo con la aplicación rápida de la carga axial. Los esfuerzos efectivos en esta prueba no se conocen bien.

El ensayo UU es usualmente llevado a cabo sobre especímenes de arcilla, enmarcando la realización del ensayo dentro del concepto de resistencia para suelos cohesivos saturados, en donde se expresan los resultados en términos de esfuerzos totales. La envolvente de falla para los criterios de Mohr del esfuerzo total se convierte en una línea horizontal, con una condición de $\varphi = 0^\circ$ (ángulo de fricción) y $\tau_f = C_u$, siendo C_u la resistencia al cortante no drenada, la cual es igual al radio de los círculos de Mohr.

Los ensayos en el laboratorio tales como el Ensayo de Corte Directo y Compresión Triaxial es donde se pueden estudiar las propiedades de los suelos en condiciones estrictamente controladas. No obstante es necesario obtener una Muestra Inalterada de suelo.

Si bien se han realizado progresos en los métodos de muestras intactas, siempre resulta ser una operación algo brutal que altera más o menos las propiedades originales del suelo. El posterior traslado y almacenamiento pueden aumentar aún más la perturbación. La toma de muestras inalteradas, por otro lado, solo es posible en suelos dotados con cierta cohesión. Otro inconveniente de las muestras son la modesta representatividad de la masa total del suelo y el hecho de que los ensayos

suelen ser lentos y costosos por lo que a su vez se trata de limitar su número (Devincenzi & Frank, 2004).

Además, las formulas teóricas clásicas que utilizan estos parámetros mecánicos conducen muchas ocasiones a resultados en perfecta contradicción con la experiencia. Por ejemplo, los asientos reales de una cimentación generalmente son solo una fracción de los calculados a partir de ensayos Edométricos. El tiempo de consolidación de suelos blandos bajo la carga de un terraplén suele ser bastante menor que el estimado a partir del coeficiente de consolidación determinado también en el edómetro. Incluso, muchas veces la consolidación suele ser sorprendentemente más rápida que la prevista (Devincenzi & Frank, 2004).

➤ **Ensayo de Penetración Estándar (SPT)**

El Ensayo de Penetración Estándar nació en el año 1927 y es el pionero de los ensayos in situ tal cual hoy son conocidos. Fue desarrollado por un sondista de la Raymond Concrete Pile Co., quien propuso a Terzaghi contabilizar el número de golpes necesarios para hincar 1 pie el tomamuestra (Devincenzi & Frank, 2004).

Después de acumular un gran número de ensayos, Terzaghi y Peck (1948) publicaron los resultados y hoy en día es uno de los ensayos más utilizados debido a la sencillez de su ejecución además de ser más económico que los ensayos en laboratorio (Devincenzi & Frank, 2004).

El ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test) SPT, determina las propiedades ingenieriles de los suelos y su aplicación a los problemas geotécnicos. Su metodología incluye la penetración dinámica de un elemento captor (cuchara partida), el cual normalizado y debidamente calibrado permite cuantificar algunas propiedades mecánicas (Aguay & Dranichnikov, 2015).

El ensayo consiste en hincar un tomamuestras o cuchara partida, de 0,45 m (18 in) de largo colocado al extremo de una varilla de acero macizo que se utiliza para transmitir la energía de golpeo, por medio de un peso (martillo) de 63,5 kg (140 lb) que se deja caer libremente desde una altura de 0,76 m (30 in). Todo el procedimiento se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para hincar la cuchara los primeros 15 centímetros, **N** entre 0 y 15 cm.

Seguidamente se realiza la prueba en sí, introduciendo otros 30 centímetros, anotando el número de golpes requerido para la hincada en cada intervalo de 15 centímetros de penetración **N** entre 15 y 30 cm y **N** entre 30 y 45 cm.

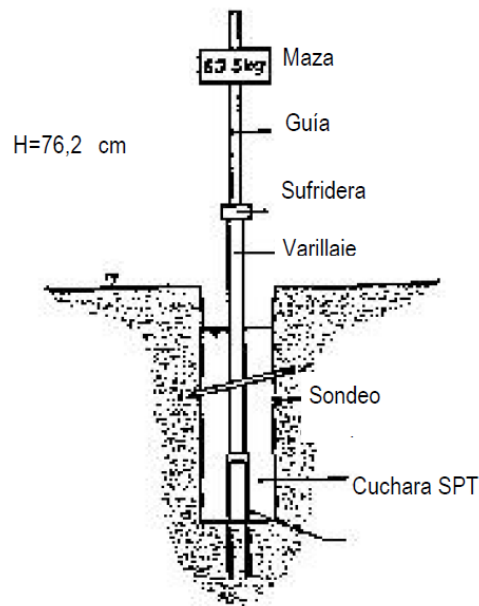


Figura 2.3. Esquema del ensayo de penetración estándar (SPT) (Devincenzi & Frank, 2004).

La lectura del golpeo del primer y último tramo no se tiene en cuenta, del primer por posible alteración del suelo o derrumbes de las paredes del sondeo y del último por posible compactación en segundo.

Los valores del golpeo de los tramos conducen al resultado del ensayo es el golpeo **SPT o resistencia a la penetración estándar**:

$$N_{SPT} = N_{15-30} + N_{30-45}$$

En ensayos in situ como lo es SPT se puede apreciar la heterogeneidad del subsuelo y someter los resultados experimentales a un análisis estadístico de los parámetros mecánicos y no adoptar sistemáticamente los valores más débiles como se tiene tendencia a hacer con los ensayos de laboratorio. Por otra parte presentan otras valiosas ventajas: son rápidos, relativamente económicas y proporcionan una abundante cantidad de datos (Devincenzi & Frank, 2004).

Los resultados del ensayo se correlacionan empíricamente con las propiedades específicas in situ del terreno. La gran mayoría de datos y correlaciones corresponden a terrenos arenosos. La presencia de gravas complica la interpretación, cuando no impide su realización. En resumen, el ensayo resulta apropiado para terrenos en los que predomina la fracción arena con reserva tanto mayor es la proporción de la fracción limo-arcilla o de fracción grava (Muelas Rodríguez, 2010). Por lo que las correlaciones empíricas son aproximadas y su uso depende en gran medida de la experiencia de quien la utiliza.

2.1.2. Caracterización mediante pruebas geofísicas modernas

Existen ciertas condiciones que favorecen o aconsejan el empleo de los métodos geofísicos para la caracterización de un suelo y tienen que ver, en primer lugar, con la insuficiente información obtenida por métodos convencionales, insuficiencia que puede deberse a problemas técnicos o bien a costos excesivos. En segundo lugar, con la existencia de respuestas físicas medibles en función de los prospectos de interés geológico. Y en tercer lugar, con la factibilidad de resolución técnica práctica en la ejecución de el o los métodos potencialmente útiles.

Al tener en consideración todo lo anteriormente dicho, se puede precisar de la utilización de algunos de los métodos geofísicos actuales.

En el siguiente apartado de nuestro proyecto de titulación, se podrá describir de manera completa cada uno de los métodos mayormente utilizados y difundidos actualmente y su aplicación en el campo de la Ingeniería Civil-Geotécnica. Sin embargo, antes de pasar a describirlos, es importante saber exactamente cuál es la definición de la Geofísica y su aplicación en este extenso campo de estudio.

2.2. Geofísica

La Geofísica (etimológicamente, del griego, *naturaleza de la Tierra*) es la ciencia que estudia los campos físicos vinculados a nuestro planeta. Es decir, que estudia la Tierra mediante métodos de la física, de carácter indirecto, a fin de conocer su evolución y características actuales (geofísica pura) y también como herramienta de prospección de recursos (geofísica aplicada). Pueden medirse directamente los campos físicos naturales (gravedad, magnetismo, radioactividad, etc.) o generarse campos artificiales por emisión de electricidad, energía sísmica, etc., para así obtener mediciones más efectivas a los fines exploratorios (Chelotti, L., Acosta, N., Foster, 2009).

2.2.1. División de la Geofísica

Uno de los problemas de una ciencia tan amplia como la Geofísica es el de establecer un criterio racional para su división. Si en un principio era fácil el considerarla como una única ciencia, el desarrollo de los últimos años hace cada vez menos posible el abarcar tanto los campos en los que se ha ido subdividiendo como la diversidad de los métodos que en cada uno de ellos se utilizan (Villamizar, 2011).

Considerando lo anterior, se podría dividir a la Geofísica en las siguientes ramas, teniendo en cuenta, los campos más relevantes y directos de estudio e investigación, para los cuales la aplicación de la Geofísica como ciencia es directa, de esta manera se clasificaría en las siguientes ramas y ciencias de estudio:

- Geodesia y Gravimetría
- Sismología.
- Geomagnetismo y Aeronomía.
- Oceanografía física.
- Meteorología.



- Geodinámica.
- Geoquímica y Volcanología.
- Planetología
- Prospección Geofísica

2.2.2. Prospección de la Geofísica

La aplicación de los conocimientos que brinda la Geofísica en favor de la humanidad, es lo que se denomina "prospección geofísica", es decir un conjunto de técnicas físicas y matemáticas aplicadas a la exploración del subsuelo; para la búsqueda y posterior estudio de yacimientos, de sustancias útiles (petróleo, aguas subterráneas, minerales, carbón, etc.) por medio de observaciones en la superficie de la Tierra de las propiedades físicas de los materiales en el interior de la misma (Villamizar, 2011).

Los métodos geofísicos de prospección han resultado de gran utilidad en el estudio y desarrollo de las geociencias. La integración de los diferentes métodos geofísicos permite realizar interpretaciones globales relacionadas con cualquier fenómeno geológico que sea de carácter prospectivo para la geotecnia y en el campo de la investigación para determinar las características geológico-geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas del reconocimiento geotécnico.

Estos métodos representan una herramienta indispensable en la exploración de suelos y pueden ser clasificados como:

- Métodos eléctricos
- Método gravimétrico
- Métodos magnético
- Métodos sísmicos

Cada uno de estos métodos se emplea dependiendo del objetivo y la profundidad que se desee alcanzar en el subsuelo. Se debe a que mediante estos estudios se obtiene una mayor cantidad de información en relación a estructuras presentes en el subsuelo. Sirven para evaluar las características del terreno basándose en la medida de ciertas magnitudes físicas tomadas generalmente en la superficie del terreno y, si son diferentes entre sí, es posible localizar los contactos entre las distintas capas de terreno.

2.2.2.1. Métodos Eléctricos

Los métodos eléctricos se fundamentan en el registro de magnitudes eléctricas del campo electromagnético en el suelo y subsuelo terrestre, las que, luego de que son procesadas e interpretadas, podrán conducir a la identificación de valores singulares vinculados a objetivos de interés científico o eventualmente aplicado (Chelotti, L., Acosta, N., Foster, 2009).

Este tipo de métodos conocidos generalmente también como métodos de prospección eléctrica, basan su aplicación en la fenomenología de conductividad

eléctrica, y de los potenciales de oxidación-reducción (REDOX), por lo que ha sido una herramienta muy popular, y aplicada de manera exitosa por casi cien años. La aplicación principal consiste en localizar cuerpos de materiales geológicos capaces de almacenar agua; zonas de agua caliente o vapor; estratos arcillosos encajonados por rocas, o más compactos; mapeo de contaminantes; demarcación de plumas de contaminantes, y localización de oquedades, entre otros.

2.2.2.2. Método Gravimétrico

La presencia del campo gravimétrico es utilizada por la geofísica para detectar las variaciones verticales y laterales de las diferencias de densidades de las unidades geológicas en el subsuelo (Chelotti, L., Acosta, N., Foster, 2009).

Los métodos gravimétricos son métodos pasivos que permiten la medición de las propiedades gravimétricas en cualquier condición geológica. Grandes avances en la teoría de campos potenciales, técnicas de adquisición, algoritmos de interpretación y visualización permiten que la gravimetría sea usada en nuevas y avanzadas formas para solución de problemas en exploración e ingeniería y geotecnia.

Entre sus principales aplicaciones se encuentran las siguientes:

- Detección de exceso de masa: sulfuros masivos, etc.
- Detección de falta de masa: carbón, depósito de sal, etc.
- Estudio de placeres en actividades mineras.
- Mapeo geológico regional: cuencas, grabens, etc.
- Definición de la morfología del basamento y marco estructural regional.
- Monitoreo de variaciones en aguas subterráneas.

2.2.2.3. Método Magnético

La tierra es un imán natural que da lugar al campo magnético terrestre. Las pequeñas variaciones de este campo pueden indicar la presencia, en profundidad, de sustancias magnéticas. El método magnético se utiliza para la obtención de información sobre el basamento y ubicación, en profundidad, de dichas sustancias, particularmente para entornos cristalinos y metamórficos. De igual manera, es una herramienta útil para la realización de estudios de la geología regional y estructural. Este método mide las anomalías del campo magnético y se emplea en investigaciones mineras. (Chelotti, L., Acosta, N., Foster, 2009)

2.2.2.4. Métodos Sísmicos

El método geofísico que ha proporcionado mayor información acerca del interior de la Tierra, y ha delimitado los yacimientos de hidrocarburos con mejor resolución que cualquier otro, es la sismología.

Las ondas generadas durante un terremoto o evento sísmico (artificial), se someten a detallados estudios que brindan una relevante información acerca de la



estratificación de las capas y de las discontinuidades en el interior de la Tierra (Lazcano, 2007).

El primer método sismológico practicado con fines de ingeniería fue el de “refracción”, con el que se logró interpretar:

- Presencia de cuerpos de alta velocidad
- Profundidad al techo de cuerpos de alta velocidad
- Gradientes de velocidad

De las desventajas para aplicar la sismología se tienen:

- Los materiales suaves confinados por aquellos densos no son detectados.
- Una capa de espesor menor a un-cuarto de la profundidad al techo del mismo, no se detecta.

2.2.3. Ondas Sísmicas

Podría definirse a las ondas sísmicas como una cantidad pequeña de energía elástica de deformación que viaja a través del subsuelo desde la fuente sísmica a velocidades que dependen de las densidades del medio por el cual viajan, pero también de su módulo de elasticidad. Considerando al subsuelo como un medio elástico es decir un material que está sujeto a sufrir deformaciones reversibles, por la acción de fuerzas exteriores, como son la magnitud y orientación del esfuerzo y el tiempo en el cual es sometido el material(Lazcano, 2007).

2.2.3.1. Elementos de una Onda

- Amplitud (A): Altura alcanzada por la onda medida sobre el nivel de referencia.
- Período (T): Tiempo entre las repeticiones sucesivas de la onda, su unidad es el segundo.
- Frecuencia (f): Número de onda por unidad de tiempo. Es el inverso del período. Su unidad es el Hz.
- Longitud de onda (λ): Distancia entre sucesivas repeticiones de la onda. Se mide en metros.
- Número de Onda K ($1/\lambda$): Número de onda por unidad de distancia. Su unidad es 1 / metros.
- Fase (θ): Desplazamiento en fracciones de ciclos, de un punto dado sobre la onda.
- Velocidad (V): Número de ondas por unidad de tiempo que pasan por un mismo punto.
 $V = \lambda * f$.

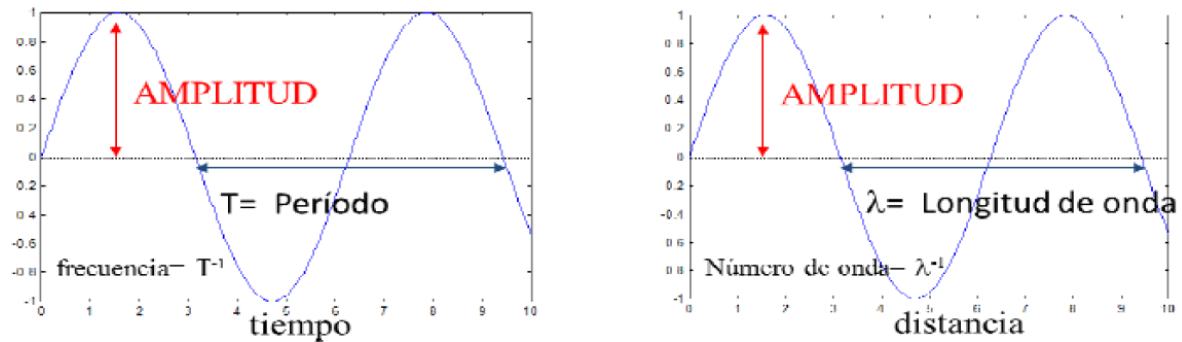


Figura 2.4. Elementos de una onda.

Fuente: Curso de Interpretación sísmica Campo Escuela Colorado, 2011

2.2.3.2. Tipos de Ondas Sísmicas

Los principales tipos de ondas sísmicas son: Ondas de Cuerpo, aquellas que viajan a través del medio propiamente dicho, y Ondas de Superficie, que son aquellas que viajan a lo largo de las interfaces (Lazcano, 2007).

➤ Ondas Sísmicas de Cuerpo:

Estas ondas elásticas se propagan en el interior de la tierra. En prospección de reflexión y refracción, estas ondas son la fuente de información usada para representar el interior de la Tierra, debido a la propagación en todas las direcciones lejos de la fuente, a su vez este tipo de ondas se divide en: Ondas P y Ondas S (Mercedes & Montenegro, 2005).

• Ondas P

Las Ondas P o también conocidas como ondas de compresión, se propagan en la superficie y en el subsuelo, y retornan por reflexión y refracción; poseen las velocidades más altas y arriban antes que ninguna otra, se denotan como " V_p ". La velocidad de propagación en los materiales geológicos varía de acuerdo con:

- Grado de acidez de la roca
- Grado de saturación de cualquier fluido
- Consolidación, consistencia y compactación
- Cantidad de agua retenida en los poros
- Fracturamiento
- Densidad
- Meteorización
- Profundidad
- Alteración

El rango de velocidades de estas ondas varía entre 300 m/s y 7000 m/s, de acuerdo con los valores de la tabla 2.1 según las investigaciones de Jakovsky.

Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos		
Material Tipo	Velocidad de Compresión (m/s)	
Material superficial (Capa de alteración de suelos y rocas)	305	610
Grava, arena y arcillas (secas y húmedas)	468	915
Arena húmeda	610	1830
Areniscas y lutitas	1830	4270
Caliza	2140	6100
Granito	4580	5800
Rocas metamórficas	3050	7020

Tabla 2.1. Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos

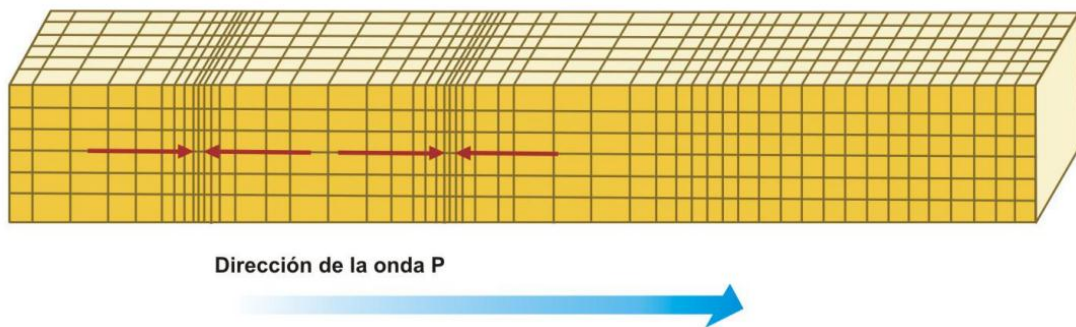


Figura 2.5. Ondas Primarias "P" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES–).

• Ondas S

Conocidas también como ondas transversales secundarias o de corte, " V_s ". El movimiento de partículas en este caso ocurre perpendicular a la dirección de propagación por efecto del esfuerzo de corte. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 58% de la de una onda P para cualquier material sólido.

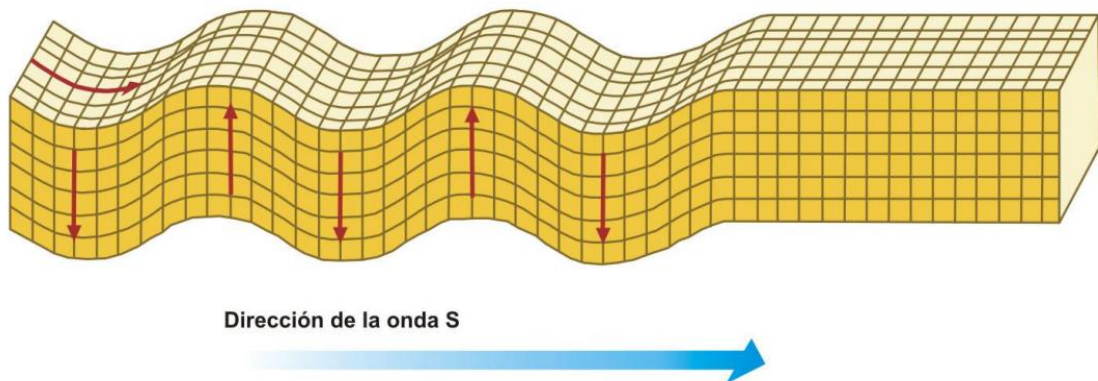


Figura 2.6. Ondas Secundarias "S" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES-).

➤ Ondas Sísmicas de Superficie:

Son Ondas que se propagan a lo largo de la superficie de la tierra. Sus amplitudes en la superficie de la Tierra pueden ser muy largas, sin embargo, decaen exponencialmente con la profundidad. Se propagan más lentamente que las ondas S, se generan con menor eficiencia por fuentes enterradas y tienen amplitudes que decaen más lentamente con la distancia desde la fuente, que las observadas en las ondas corporales (Chammas, Abraham, Cote, Pedersen, & Semblat, 2003).

Estas ondas son producto de la energía que poseen las ondas de cuerpo que llegan a la superficie. Existen dos tipos de ondas superficiales: Love y Rayleigh.

• Ondas Love

Ocurren solo en donde un medio con ondas S de baja velocidad subyace de una capa con ondas S de mayor velocidad. El movimiento de partículas ocurre en la dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda pero paralelo a la superficie.

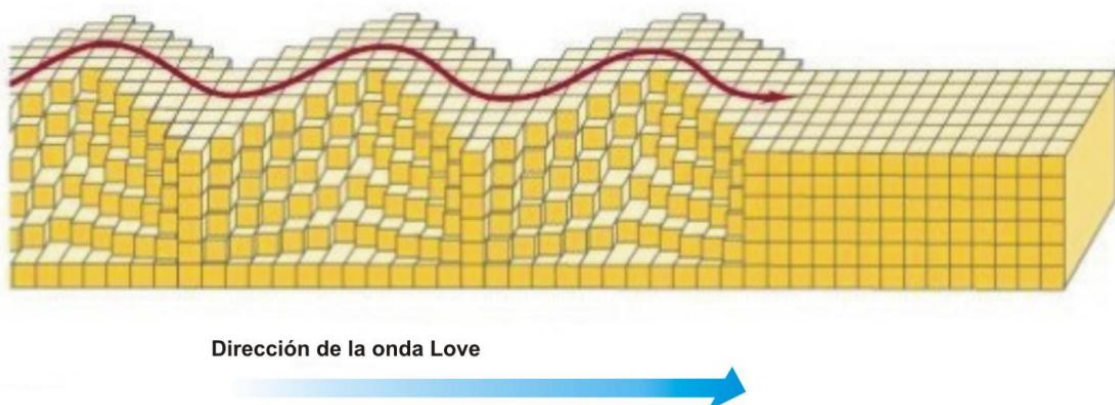


Figura 2.7. Ondas Love "L" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES-).

- **Ondas Rayleigh**

Viajan a lo largo de la superficie libre de la tierra con amplitudes que disminuyen exponencialmente con la profundidad. El movimiento de las partículas es en sentido elíptico retrogrado (en dirección de las agujas del reloj) en un plano vertical con respecto a la superficie, como contienen componentes de corte solo viajan a través de medios sólidos. Su velocidad de propagación que se define como velocidad de fase C_r , es determinada principalmente por la velocidad V_s de los materiales. La relación entre ambas se expresa como $C_r = 0.94V_s$ (Lazcano, 2007).

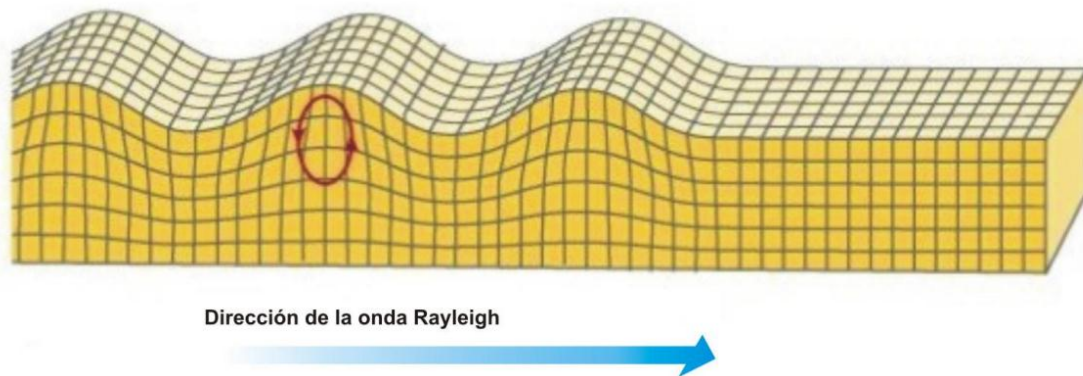


Figura 2.8. Ondas Rayleigh "R" (Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES-).

Las ondas Rayleigh son las principales causantes de las sacudidas sentidas durante la ocurrencia de un terremoto, por lo tanto, son las principales responsables de los daños causados a las estructuras durante el desarrollo de estos fenómenos. El ground roll es un tipo particular de ondas Rayleigh y viaja a lo largo o cerca de la superficie del suelo. Aunque el ground roll es considerado ruido en estudios de ondas corporales (en reflexión y refracción), sus propiedades dispersivas son usadas para inferir propiedades elásticas cercanas a la superficie.

Cuando el medio en que se propagan las ondas sísmicas no es homogéneo, se produce los fenómenos de: atenuación inelástica, difracción, divergencia esférica, dispersión, conversión de modo de ondas y scattering, estos fenómenos se explicarán posteriormente en el apartado 2.2.5 (Factores que afectan la propagación de ondas)

La disminución de la energía sísmica, causada por los tres fenómenos explicados anteriormente, va acompañada de pérdidas debidas a la absorción de la energía, produciendo *amortiguamiento*. Cuando el impulso sísmico viaja a través de las

diferentes capas, las altas frecuencias son absorbidas más rápidamente que las bajas frecuencias.

Las fuentes primarias de las ondas sísmicas pueden ser clasificadas según Lay & Wallace (1995), en tres tipos: Internas, Externas, y Mixta. Sin embargo, las fuentes más comunes que involucran proceso de interés y que guardan relación con las ciencias de la tierra son:

Internas	Externas	Mixtas
Fallas Sísmicas	Vientos, Presión atmosférica	Erupciones Volcánicas
Explosiones internas	Oleaje y mareas	Deslizamientos
Flujo hidrológico	Ruido cultural(tráfico, trenes)	Avalanchas
Movimientos de Magmas	Impacto de Meteoritos	
Explotación minera subterránea	Explotación Minera Superficial	

Tabla 2.2. Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas.

2.2.4. Principios y leyes que rigen las ondas

Chelotti y Acosta, indican que las leyes que gobiernan la propagación de las ondas y las trayectorias de las mismas son:

- Principio de (Christian) Huygens (holandés, 1670)
- Principio de (Pierre) Fermat (francés, 1670)
- Ley de (Willebrord) Snell (holandés, 1621)

➤ Principio de Huygens

Cada punto de un frente de ondas se convierte en emisor de un nuevo frente de ondas en todas direcciones. Todos estos nuevos frentes se integran en uno único mientras el medio de propagación sea homogéneo. En un medio isótropo el frente de ondas es esférico. Si el medio es anisótropo el frente de onda se deforma. Y si encuentra heterogeneidades genera difracciones.

➤ Principio de Fermat

El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es mínimo.

➤ Ley de Snell

Los rayos incidente y refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia están en un mismo plano. La relación entre los senos de los ángulos incidente i y de refracción r medidos entre los rayos y la normal es constante entre dos medios e igual a la relación de velocidades de la onda entre uno y otro medio, constante que se conoce como índice de refracción n

$$n = V_1 / V_2 = \sin \theta_1 / \sin \theta_2$$

Esta ley es muy importante en la caracterización de suelos, ya que los métodos sísmicos se basan en que la velocidad de las ondas elásticas es diferente para rocas diferentes.

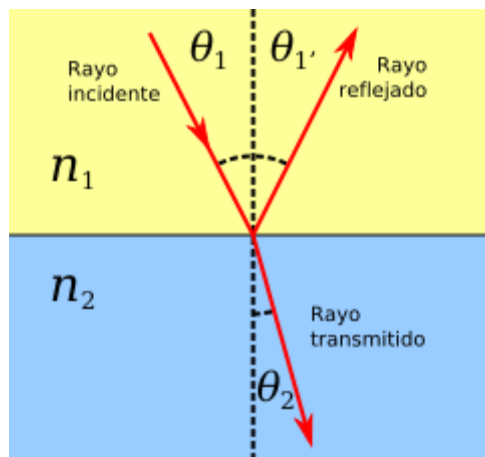


Figura 2.9. Diagrama de reflexión y refracción, Ley de Snell.

2.2.5. Factores que afectan la propagación de las ondas

(Chelotti, L., Acosta, N., Foster, 2009) indica que los principales factores que afectan la propagación de las ondas sísmicas en un medio según son:

- **Absorción o Atenuación inelástica:** Es la pérdida de energía de la onda debida a la fricción entre granos de la roca y que se convierte en calor. Está en relación directa con la compactación y resulta: $A_i = A_o \cdot e^{-q \cdot r}$ (siendo A_o la amplitud o intensidad inicial, r la distancia recorrida y q el coeficiente de absorción, en dB/λ)
- **Divergencia esférica:** Es la distribución de la energía inicial focal (teóricamente puntual) en una superficie cuasi-esférica cada vez mayor. Representa la disminución exponencial de la relación energía/área.
- **Difracciones:** Análogamente a los fenómenos ópticos, son consecuencia del Principio de Huygens y se producen por heterogeneidades laterales (fallas, cambios bruscos de buzamiento, terminaciones rocosas subhorizontales, etc.).
- **Dispersión:** Los cambios de la frecuencia producen variaciones en la velocidad de las ondas, ya que existe una dependencia física. Una gran disminución de

frecuencia produce una pequeña reducción de la velocidad. (Es el mismo efecto que sufre la luz cuando separa sus colores en un prisma: para cada frecuencia, distinta velocidad y, por lo tanto, distinto ángulo de refracción.)

- **Desperdigamiento (Scattering):** El choque de las ondas con partículas menores produce ondas pequeñas que propagan energía en todas direcciones.
- **Conversión de modo de ondas:** Cuando una onda P que viaja a través de un medio llega a una interfaz con un ángulo de incidencia menor que 90 grados, parte de su energía es reflejada, parte es transmitida y otra parte se convierte en ondas S. Los ángulos con que cada rayo de onda P y S reflejada y transmitida viajará por el medio están dados por la ley de Snell.

2.2.6. Parámetros que afectan la velocidad de las ondas

(Villamizar, 2011) indica que los parámetros que afectan la velocidad de propagación de las ondas sísmicas son:

- *Litología:* La velocidad de las ondas es diferente para rocas diferentes.
- *Porosidad:* Disminuye con la profundidad aumentando la densidad y la velocidad.
- *Edad de la roca:* No varía por sí misma la velocidad pero si los procesos asociados al paso del tiempo.
- *Fluidos y saturación de agua:* Al aumentar la densidad del fluido intersticial la velocidad aumenta.
- *Cementación:* Aumenta la velocidad, disminuye la porosidad y aumenta los módulos elásticos.
- *Presión de poros y presión litostática:* Si la presión litostática aumenta y la presión de poros se mantiene constante la matriz se comprime aumentando los módulos elásticos y la densidad varía aumentando la velocidad.
- *Contenido de arcillas:* Para niveles de arcilla bajos la velocidad aumenta hasta el punto en el cual desciende debido a que la arcilla empieza a hacer parte de la matriz.
- *Geometría de los poros:* La geometría y relación entre ellos determina parcialmente la estructura sólida de la roca y los módulos elásticos.
- *Anisotropía:* La velocidad se ve afectada por el ángulo de incidencia de la onda y el plano normal.



- *Temperatura*: Experimentalmente se ha observado una disminución de la velocidad con el aumento de temperatura.

2.3. Métodos Sísmicos

Los métodos sísmicos pueden ser clasificados en dos tipos:

- ✓ Métodos Sísmicos Invasivos
- ✓ Métodos Sísmicos No Invasivos.

2.3.1. Métodos Sísmicos Invasivos

Estos métodos requieren de una perforación para la ubicación de fuentes y/o receptores de las ondas sísmicas, y son utilizados para la determinación de perfiles de velocidades de ondas de corte o longitudinal, dependiendo de las ondas generadas por la fuente.

La gran ventaja de estos ensayos es que permiten medir directamente las velocidades de propagación de ondas de corte en el suelo. Sin embargo, tienen la gran desventaja de requerir perforaciones en terreno, lo cual puede resultar muy costoso e impracticable para muchos casos reales. Fuera de estas limitaciones prácticas, los métodos basados en sondajes son mediciones muy locales y puntuales que pueden no representar correctamente el comportamiento global de un sitio, especialmente cuando la perforación atraviesa irregularidades puntuales del terreno (lentes).

Los métodos más importantes dentro de esta clasificación son: Método Up-Hole, Down-Hole y Cross-Hole.

2.3.1.1. Up-Hole

Este método se basa en la medición de tiempos de viaje de ondas longitudinales o de corte, propagándose verticalmente en depósitos de suelo (López, Mejía, & Vega, 2008).

El método Up-Hole consiste en generar ondas en un punto de la perforación y monitorear su arribo a la superficie. Generalmente se utilizan explosivos como fuente generadora de ondas de corte (ondas S) y ondas longitudinales (ondas P) de manera simultánea. Las llegadas de estas dos ondas son monitoreadas por varios receptores (geófonos) instalados en un arreglo en la superficie del terreno (López et al., 2008).

Algunas de las limitaciones que presenta este ensayo son: el grado de alteración del suelo cuando se realiza el sondeo, posibles efectos de fluidos en el sondeo, excesivo o insuficiente impulso, efectos de ruido sísmico y efectos del nivel freático. Así mismo, la expansión geométrica y el amortiguamiento pueden influir en las longitudes de onda y por tanto, las velocidades de las ondas S pueden tener una

interpretación incorrecta para profundidades superiores a 30-60 m (López et al., 2008).

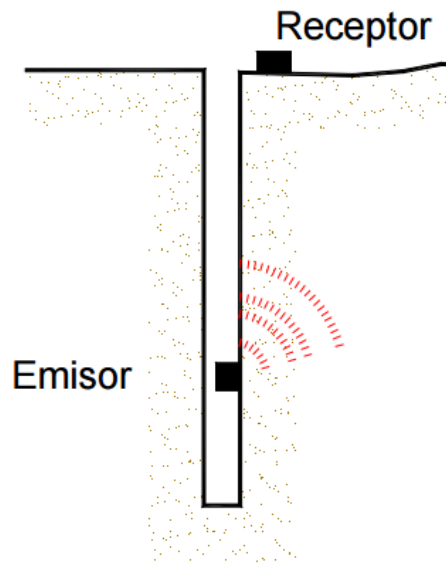


Figura 2.10. Esquema del ensayo Up-Hole (Gonzales, 2011).

2.3.1.2. Down-Hole

En el caso del método Down-Hole, un receptor (geófono o hidrófono) es adherido a la pared de la perforación, para la medición de los tiempos de viaje de las ondas sísmicas propagándose hacia abajo, a partir de la fuente ubicada en la superficie del terreno (López et al., 2008). El ensayo se puede realizar con un sólo receptor que va descendiendo para obtener la velocidad de corte a distintas profundidades, o con un arreglo de receptores distribuidos a lo largo de la perforación que graban la señal emitida por la fuente de manera simultánea (Guarachi, 2013).

De acuerdo a la norma ASTM7400-08, el golpe debe poder ser aplicado en sentidos opuestos, en lo posible con la misma energía de tal forma, que se pueda reconocer el instante en que llega la onda de corte mediante la polarización o desfase de las señales registradas. Además, la norma recomienda ubicar la placa a 1 a 3 metros desde la perforación, con el objeto de que las ondas se propaguen principalmente en la dirección vertical. Dado que la principal componente de propagación de las ondas es vertical, el perfil de velocidades de ondas de corte se puede determinar directamente de las señales registradas (Guarachi, 2013).

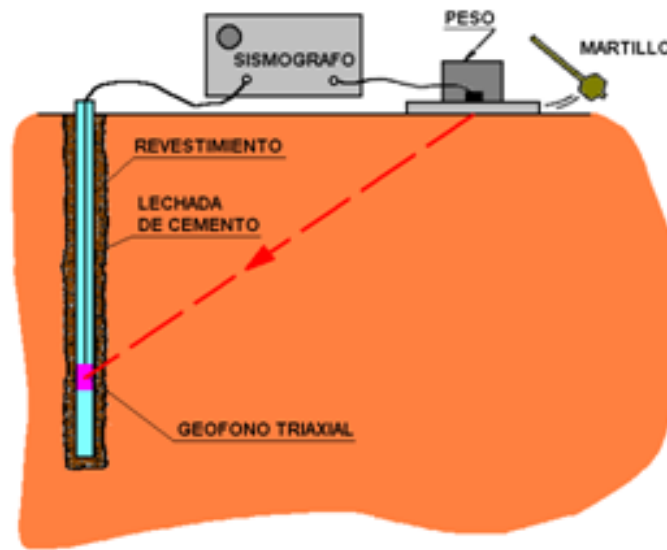


Figura 2.11. Esquema del ensayo Down-Hole (BASALTO IT).

El ensayo Down-Hole es usado con más frecuencia, debido a que genera ondas sísmicas de corte S con mayor facilidad que otros métodos (como el Up-Hole y Cross-Hole), así como su realización en áreas de ciudades muy pobladas, donde el espacio disponible es limitado (López et al., 2008).

Entre las aplicaciones más importantes de este método se encuentran: Detección de capas ciegas y la medición de la razón de amortiguamiento del suelo, reconocer los contactos entre las distintas unidades litológicas reconocidas hasta la profundidad de investigación, evaluar las características geotécnicas de cada unidad geológica e identificar posibles zonas de falla, de fracturamiento/alteración de rocas (Correia, 2015).

Algunas de las limitaciones que este ensayo presenta son: el grado de alteración del suelo cuando se realiza el sondeo, posibles efectos de fluidos en el sondeo, excesivo o insuficiente impulso, efectos de ruido sísmico y efectos del nivel freático. Así mismo, la expansión geométrica y el amortiguamiento pueden influir en las longitudes de onda y por tanto las velocidades de las ondas S pueden tener una interpretación incorrecta para profundidades superiores a 30-60 m (López et al., 2008). Además de requerir de una gran precisión en la determinación de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, la importancia en que la sonda se desplace centrada a medida que baja o sube por el pozo, pues podría afectar los tiempos de llegada en que son recogidas por el sensor receptor y propiciar una interpretación errónea respecto de la isotropía del medio. Cuando el pozo es entubado (para evitar colapso), existe el riesgo que la onda viaje a través del relleno del espacio anular del pozo. Por lo tanto el relleno debe ejecutarse con un grout (lechada de cemento) de densidad similar a la del suelo (Correia, 2015).

2.3.1.3. Cross-Hole

Este ensayo requiere de dos o más perforaciones alineadas. En una de ellas se ubica la fuente, y en las restantes los receptores a la misma profundidad. De esta manera se miden la velocidad de propagación de las ondas a través del material situado entre ambos sondeos. La primera medición se debe hacer a una profundidad que no supere los 1.5 metros, luego la fuente se debe descender para realizar mediciones a intervalos no mayores a 1,5 metros, hasta la profundidad para la que se desea explorar (Guarachi, 2013).

Al igual que en el ensayo *down-hole*, se deben realizar golpes en sentidos opuestos, para diferenciar las ondas de corte de las ondas de compresión. Por ello, se golpea una pieza rígida y fija en la pared de la perforación hacia abajo y hacia arriba, para observar la polarización o desfase de las señales registradas, en lo posible con la misma energía (Guarachi, 2013).

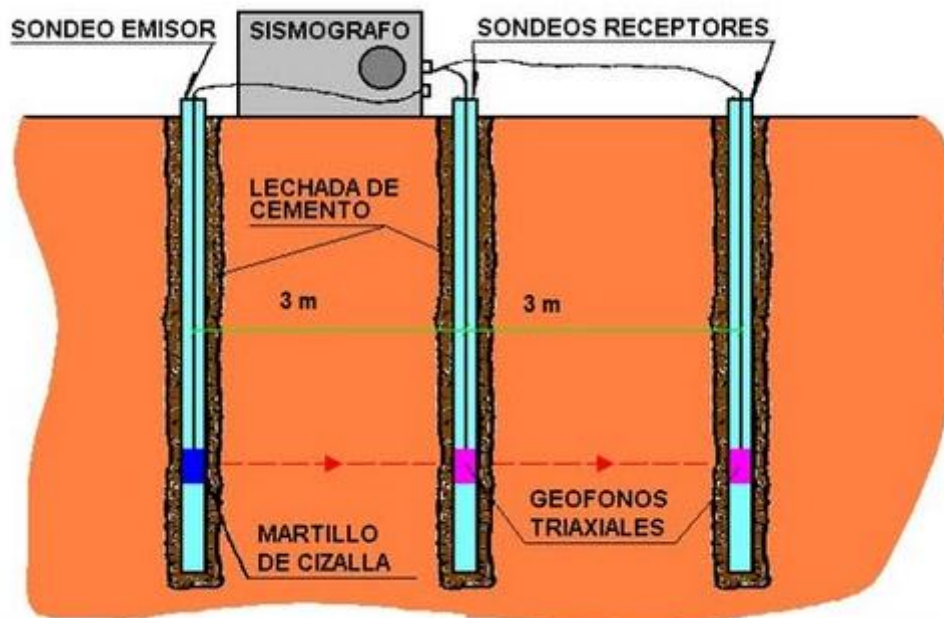


Figura 2.12. Esquema del ensayo Cross-Hole (AIG Instrumentos).

Para este ensayo se utilizan receptores triaxiales que permitan registrar las componentes horizontales y verticales del desplazamiento. Debido a que el golpe es aplicado en la dirección vertical, la componente horizontal del desplazamiento registrado permitirá determinar las velocidades de ondas de compresión, mientras que la componente vertical, las velocidades de ondas de corte (Guarachi, 2013)

Se recomienda utilizar por lo menos dos o tres sondeos para minimizar los errores provenientes de las medidas del tiempo de disparo, los efectos del material superficial e intersondeos y la anisotropía. Las velocidades de onda se calculan a partir de la diferencia en los tiempos de llegada en el par de pozos. Los tiempos de llegada se determinan visualmente usando puntos de fase común (primera llegada, primer peak, etc.), o por medio de técnicas de correlaciones cruzadas usadas habitualmente en exploración petrolera (Correia, 2015).

Entre las ventajas que este método ofrece, se encuentran: obtención de perfiles de velocidades a profundidades en el rango de 30 a 60 m. (utilizando fuentes emisoras mecánicas) y a profundidades mayores de 60 m (utilizando fuentes emisoras de tipo explosivo), así como la detección de capas ciegas (con mayor facilidad que otros métodos sísmicos) (Correia, 2015). El ensayo *cross-hole*, es el método más preciso, debido a que permite determinar las características mecánicas del suelo directamente en un plano horizontal, y no a lo largo de un pozo (Guarachi, 2013).

Algunas de las limitaciones que este ensayo presenta son: las velocidades de las ondas sísmicas son sensibles a la distancia emisor-receptor (especialmente en sondeos de 15 a 20 m de profundidad), las velocidades de las ondas pueden enmascarse si se atraviesan capas de alta velocidad (en estos casos se requieren otros métodos como la refracción sísmica), corrección de trayectorias de la curvatura del rayo sísmico en materiales que varían continuamente de velocidad (López et al., 2008) y por último, el alto costo debido: a los costos de las perforaciones y a los mecanismos costosos y en muchos casos de gran complejidad para generar ondas de corte en el desarrollo del ensayo (Guarachi, 2013).

2.3.2. Métodos Sísmicos No Invasivos.

Estos ensayos se realizan sobre la superficie del terreno, y se conoce como un método no invasivo ya que no necesita de perforaciones para la determinación de V_s y V_p ni en profundidad, a diferencia de los métodos conocidos como down-hole, up-hole o cross-hole. Además en comparación con los métodos convencionales de rotación como sondajes entregan valores locales del perfil de velocidad de onda de corte, mientras que estos métodos cubren el subsuelo entregando una mayor cobertura (Correia, 2015).

De acuerdo a la fuente de excitación que se utilice en los ensayos pueden clasificarse como pasivos o activos:

➤ Ensayos activos

En los métodos activos, las ondas superficiales registradas son provocadas por una fuente dinámica que genera una perturbación en superficie y registradas por geófonos alineados con la fuente. Esta perturbación puede ser generada con un mazo, martillo o explosivos, dejando caer un peso al terreno o utilizando mecanismos más sofisticados que permitan un mayor control sobre las perturbaciones generadas, y por ende, sobre el rango de frecuencias y amplitud de las ondas (Guarachi, 2013).

➤ Ensayos pasivos

Los métodos pasivos se basan en la medición de vibraciones ambientales. Las vibraciones con una frecuencia superior a 1 Hz tienen su origen en la actividad humana (tráfico, maquinaria, etc.) y se conocen como microtemblores. Por otro lado,

las vibraciones de menor frecuencia, están asociadas a una fuente natural, como el oleaje, ciclones o corrientes de viento y son conocidas como microsismos. El supuesto fundamental de los métodos pasivos es considerar las vibraciones ambientales como una superposición de ondas superficiales que se propagan con una distribución aleatoria uniformemente distribuida en todas las direcciones (Guarachi, 2013)

En general, para registrar las vibraciones ambientales se utilizan arreglos bidimensionales de geófonos, ya que no se conoce a priori la dirección de propagación predominante de los distintos frentes de ondas. Sin embargo, diversos autores, han propuesto métodos que permiten analizar ensayos pasivos con arreglos lineales de geófonos, los cuales entregan resultados satisfactorios para la gran mayoría de los casos (Guarachi, 2013).

En general, gracias al tipo de fuente, los métodos pasivos permiten obtener información para rangos de frecuencias menores que los ensayos activos. Esto permite caracterizar el suelo para profundidades muchos mayores.

2.3.2.1. Mediante ondas de cuerpo (V_s y V_p).

Dentro de estos métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentran los de refracción y reflexión sísmica que permiten determinar estas propiedades elásticas directamente *utilizando ondas de cuerpo*.

2.3.2.1.1 Reflexión Sísmica

Este método es uno de los más empleados en la investigación de formaciones rocosas, prospección petrolífera (tanto en tierra como el océano) e hidrogeología, ya que permite la obtener información de capas muy profundas para la cuantificación de depósitos de roca y petróleo, determinación de límites (hasta 1000 m de profundidad), saturación (contenido de agua) y porosidad de un acuífero, así como la localización de saltos en fallas geológicas. En la actualidad, su uso está siendo recientemente renovado para la investigación de depósitos superficiales de suelo.

El método sísmico de reflexión se basa en las reflexiones del frente de ondas sísmicas sobre las distintas interfases del subsuelo. Estas interfases (reflectores) responden, al igual que en la refracción, a contrastes de impedancia que posteriormente se relacionaran con las distintas capas geológicas. Las reflexiones son detectadas por los receptores (geófonos) que se ubican en la superficie y que están alineados con la fuente emisora. Dado que las distancias entre la fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza, el dispositivo experimental soporta que se esté operando en corto ángulo; asegurando así la obtención de reflexiones y, distinguiéndose de la sísmica de refracción o de gran ángulo (Gayá, 2004).

El tratamiento de los datos en sísmica de reflexión es más laborioso y delicado que el procesado de refracción; donde uno de los retos más importantes es conseguir aislar de los registros las reflexiones, eliminando las otras ondas (onda directa, refracciones, ruido, etc.). Esta tarea implica la aplicación de tratamientos multiseñal

que, si no se hacen cuidadosamente, pueden crear artefactos y confundirse con falsos reflectores. Otro punto conflictivo del procesado es que en las secciones sísmicas de reflexión las capas reflectoras están en modo tiempo doble debido a que cada rayo reflejado ha hecho el viaje de ida y vuelta (Gayá, 2004).

2.3.2.1.2 Refracción Sísmica

El método de la refracción sísmica consiste en la medición del tiempo de viaje de la primera onda detectada (onda de compresión u onda P) en una serie de puntos separados a intervalos regulares a lo largo de una línea de referencia ubicada sobre la superficie de la tierra. Dicha línea se conoce como línea de inspección, y en cada punto de la misma se encuentra un dispositivo receptor de señales llamado geófono. Las ondas detectadas en cada receptor son originadas a partir de una fuente de energía de tipo impulsiva en una ubicación estratégica conocida con el nombre de punto de disparo, pudiendo utilizar una explosión o el impacto de un objeto sobre el terreno (López et al., 2008).

La longitud de los perfiles suele situarse habitualmente entre 20 y 200 m, con separación entre geófonos que no exceden los 10 m.

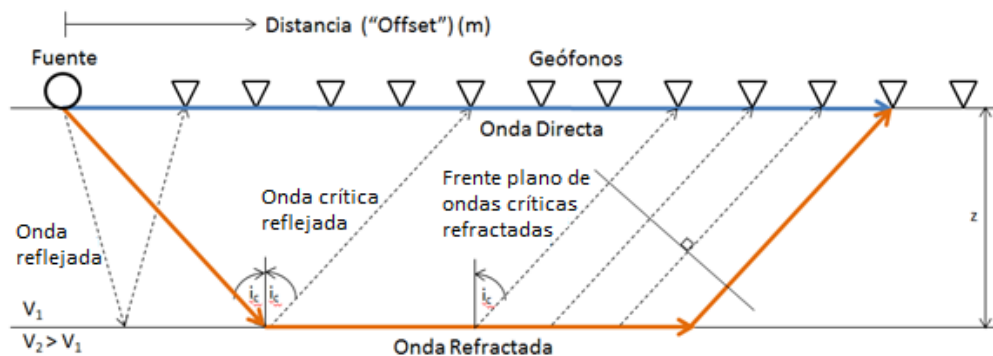


Figura 2.13. Esquema de ensayos de refracción y reflexión sísmica (Guarachi, 2013).

El instante en que se originan las ondas (llamado tiempo cero) es registrado dentro del expediente de pulsos de llegada. Cada expediente consta de un conjunto de registros individuales provenientes de cada geófono. (López et al., 2008).

Durante el procesamiento de los datos contenidos en un expediente, estos son manipulados para ser presentados en un formato gráfico llamado curva tiempo-distancia o domocrónica cuya forma está relacionada con las condiciones geológicas del lugar en estudio. Este gráfico es el punto de partida para determinar la variación de la velocidad de las ondas con respecto a la profundidad alcanzada durante el desarrollo de un ensayo de refracción. Las velocidades calculadas están relacionadas a la identificación y cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad (López et al., 2008).

Entre las aplicaciones más importantes en la Ingeniería Civil. Se utiliza para la medición de espesores de recubrimiento, profundidad de nivel freático, prospección

petrolera y en la realización estudios hidrogeológicos. Este método permite la localización (profundidad del sustrato), posición del acuífero bajo ciertas condiciones, así como la caracterización de suelos (López et al., 2008).

Algunas limitaciones en entornos urbanos el Método está limitado por la cantidad y accesibilidad de zonas descubiertas o zonas verdes con suficiente extensión de tal manera que las extensiones de terrenos disponibles en el área de estudio limitan los alcances de la aplicación del método y por ende la profundidad de exploración. Además si existe un estrato o capa que tiene una velocidad sísmica más baja que la capa inmediata superior a esta (caso de inversión de velocidad), la capa con baja velocidad sísmica no puede ser detectada (López et al., 2008).

2.3.2.2. Mediante ondas superficiales (Rayleigh)

Existen otros métodos que utilizan las *ondas superficiales* del tipo Rayleigh, como el SSRM (Steady State Rayleigh Method), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) y ESAC (método de auto correlación espacial extendida), la diferencia con la refracción y reflexión sísmica es el tipo de onda utilizado en su análisis.

El procedimiento común para la caracterización mediante ondas superficiales (Rayleigh) consta de tres pasos:

1. Adquisición de datos:

Se realiza mediante registros de campo con los debidos arreglos de geófonos que depende del método utilizado.

2. Análisis de dispersión: extracción de curvas de dispersión de cada registro

Una vez realizadas las mediciones en terreno se debe continuar con la interpretación de los datos, con el objetivo de calcular la curva de dispersión experimental que corresponde a la curva de velocidad de fase en función de la longitud de onda o de la frecuencia, construida a partir de los datos registrados en terreno.

3. Inversión: cálculo de VS en profundidad

Este análisis está orientado a identificar parámetros desconocidos de un problema a partir de un modelo físico que reproduzca de buena forma los datos que se obtienen de mediciones experimentales.

Para el análisis de ondas Rayleigh, está dado por la determinación de la curva de dispersión teórica a partir de un modelo físico de propagación de estas ondas en un medio estratificado y la comparación con la curva de dispersión obtenida a partir de los datos en terreno.

Así, el problema de inversión es un proceso de optimización que busca minimizar:

$$Error = Min(V_{observada} - V_{teorica})$$

Existen dos aspectos críticos en el problema de inversión:

- La elección de un modelo consistente para modelar físicamente el suelo.

Los métodos de caracterización geotécnica asumen que el subsuelo está formado por estratos homogéneos, lineales y elásticos, de capas planas y horizontales. Esta hipótesis no es un problema significativo ya que el método está orientado a describir la variación de las propiedades mecánicas en profundidad con un bosquejo aproximado y no exacto del subsuelo. Un problema serio en esta hipótesis es el encontrar heterogeneidades laterales en el suelo y estratos inclinados, lo que distorsiona los valores reales de los resultados.

- No unicidad de la solución encontrada.

El principal problema para la correcta convergencia de la solución en la optimización es la determinación de una condición inicial de iteración, dada por una configuración hipotética de estratos que describa la variación de la rigidez en profundidad, para el posterior proceso de iteración. La condición inicial debe ser bien elegida para la correcta convergencia de la solución.

A continuación se describe cada método y se hace revisión de los fundamentos de los métodos que utilizan ondas Rayleigh.

2.3.2.3. SSRM

El Steady State Rayleigh method (Método de Estado Estable Rayleigh, SSRM) fue el primer método que intentó determinar el perfil de velocidades de onda de corte en profundidad de manera no intrusiva, y fue propuesto por Jones en la década de los 50 (Ochoa, 2007). El "Steady State Rayleigh Method" (SSRM) utiliza las ondas superficiales del tipo Rayleigh para determinar el perfil de velocidades en la profundidad del subsuelo. El principal objetivo es determinar la velocidad de fase, que corresponde a la velocidad de propagación de una onda por una frecuencia única, al perturbar una masa de suelo con un vibrador (Correia, 2015) .

El método consiste en colocar en la superficie del terreno un vibrador vertical funcionando a una determinada frecuencia, para generar una señal. Con la ayuda de un sensor de velocidad (geófono), éste es movilizado en una línea recta imaginaria fija a partir del vibrador, alejándose hasta una distancia en la cual se observe que el sensor y el vibrador se encuentren en fase y su frecuencia de excitación sea la misma. Cuando esto ocurre, se asume que la distancia entre el vibrador y el sensor equivale a una longitud de onda (Correia, 2015).

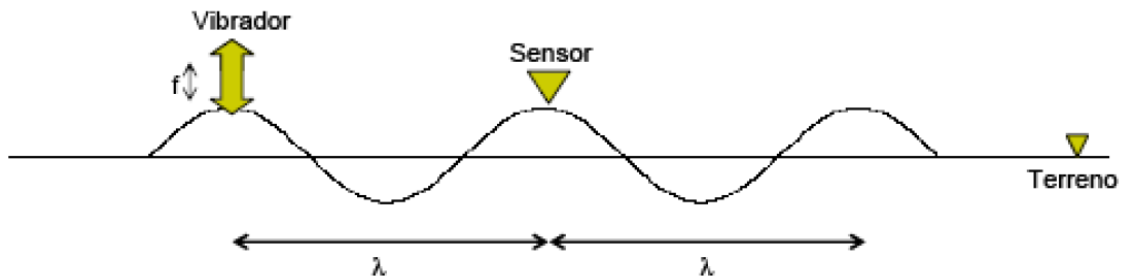


Figura 2.14. Método Steady State Rayleigh (SSRM) (Ochoa, 2007).

Una vez que se determina la longitud de onda λ , para una frecuencia f conocida, la velocidad de fase de las ondas Rayleigh (V_R) se calcula de acuerdo a la siguiente relación (Correia, 2015):

$$V_R = f \cdot \lambda$$

Una vez obtenida la velocidad de fase, se procede a la obtención del perfil de velocidades en profundidad. Para esto, se asumen las siguientes hipótesis:

Este método considera que la mayor parte de la energía está contenida en la mitad superior de la longitud de onda, por lo que la velocidad de fase para una longitud de onda dada es representativa de las propiedades del material sólo para profundidades iguales a la mitad de la longitud de onda, donde z corresponde a la profundidad (Correia, 2015).

$$z = \frac{\lambda}{2}$$

La relación entre la velocidad de onda de corte y la velocidad de fase es:

$$V_S \cong 1.1 \cdot V_R$$

VS: velocidad de onda de corte

VR: velocidad de fase de ondas Rayleigh

Estas aproximaciones para obtener los perfiles fueron desarrolladas según las limitaciones computacionales que impedían algoritmos eficientes (Ochoa, 2007).

Este método demostró entregar perfiles de velocidad aceptable para terrenos en los cuales la rigidez aumenta gradualmente en profundidad, sin embargo presenta problemas en el caso de que exista un estrato más rígido sobre otro más blando (Ochoa, 2007).

El Steady State Rayleigh Method no tuvo la masificación deseada por la ineficiencia en términos de tiempo y procesamiento de datos que requería para la obtención de resultados, a pesar de poseer enormes ventajas como el ser no intrusivo y barato.



En la actualidad, las hipótesis planteadas por Jones son un buen criterio para determinar las condiciones iniciales para los algoritmos actuales de inversión (Ochoa, 2007).

Así, no fue hasta la década del 80, gracias al avance computacional y desarrollo de algoritmos eficientes para el análisis de señales, cuando la Universidad de Texas (Austin) automatizó el método propuesto por Jones (Ochoa, 2007).

2.3.2.4. SASW

El método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves, Análisis Espectral de ondas superficiales) es una simplificación sofisticada de SSRM, introducido por primera vez por Nazarin y Stoke en 1984 (Villamizar, 2011).

En él, ya no es necesario trasladar el geófono para determinar las velocidades asociadas a las ondas (Ochoa, 2007) y solamente consiste en aplicar un impulso vertical a la superficie del terreno y registrando las señales transitorias compuestas de ondas Raleigh. Las ondas Raleigh son registradas por medio de dos o más receptores colocados en línea recta, las cuales son monitoreadas por dos o más receptores ubicados a ciertas distancias comenzando a partir del punto de impulso (López et al., 2008).

La base de este método es aprovechar la característica dispersiva de las ondas Rayleigh cuando viajan a través de un medio estratificado. La velocidad de las ondas Rayleigh es determinada de acuerdo a las propiedades del material de la superficie a una profundidad de 1 a 2 longitudes de onda (Correia, 2015).

Así, el Análisis espectral de Ondas Rayleigh combina el método propuesto por Jones y los adelantos computacionales en el análisis de señales, para desarrollar un método no intrusivo, fácil y rápido en la obtención de perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad (Ochoa, 2007).

Las longitudes de onda mayores penetran más profundamente en el terreno y su velocidad se ve afectada por las propiedades del material a mayor profundidad (Correia, 2015) como se muestra en la figura 2.15.

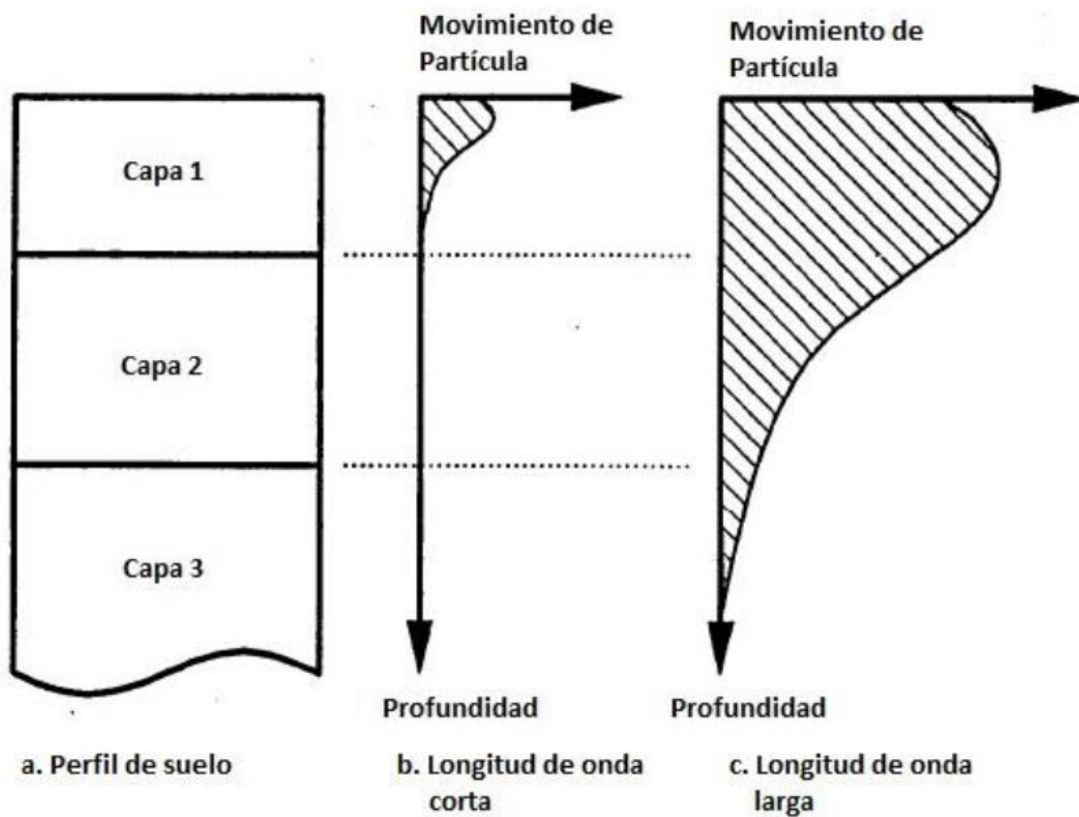


Figura 2.15. Dispersión de las ondas Rayleigh dependiendo de la longitud de onda (Correia, 2015).

La metodología para detectar señales y obtener los datos de terreno según (Ochoa, 2007) es la siguiente:

1. Existen dos configuraciones típicas para la detección de señales en terreno.

La primera es a través de la determinación de una línea imaginaria fija. Luego, dos sensores son instalados a una distancia D entre ellos, con el primer sensor colocado a una distancia D de la fuente, siendo la línea imaginaria el eje de simetría del arreglo, como se indica en la figura 2.16. Esta configuración es denominada arreglo con eje de simetría.

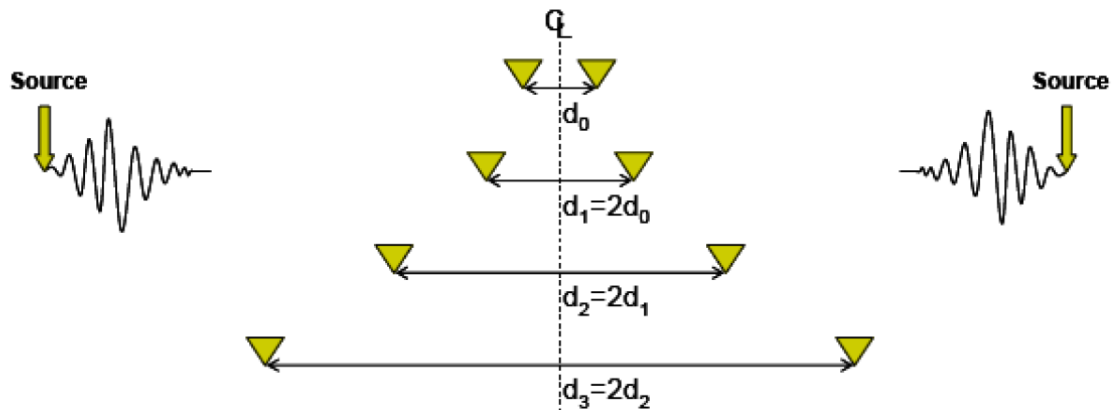


Figura 2.16. Arreglo de eje de simetría, método SASW (Ochoa F., 2007).

La segunda configuración consiste en una posición fija para la fuente y el primer sensor, variando la posición del segundo sensor como se indica en la figura 2.17. A ésta configuración se le denomina arreglo con fuente común.

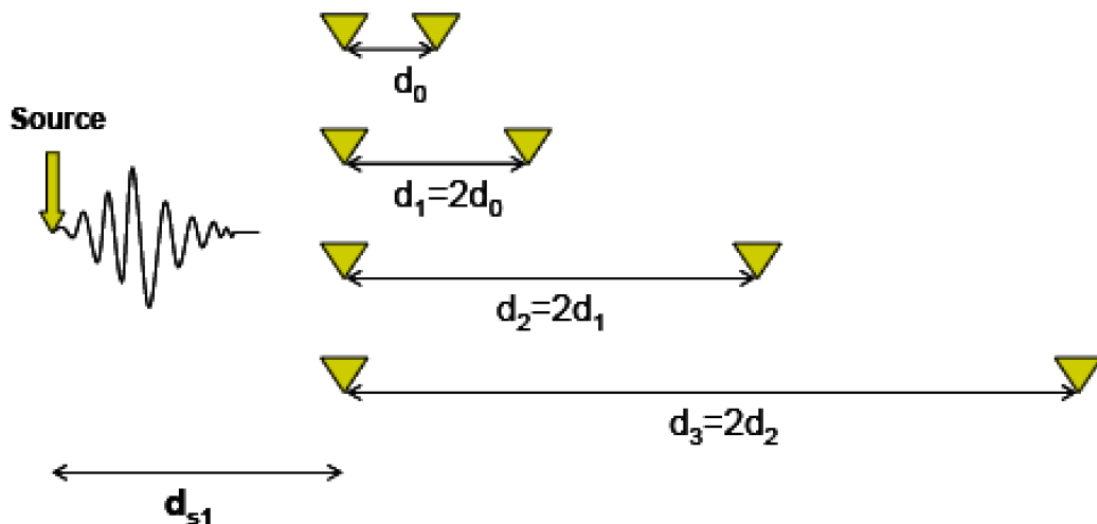


Figura 2.17. Arreglo de fuente común, método SASW (Ochoa F., 2007).

2. Una vez definida la configuración con la cual se desarrollará la toma de datos, se procede con las perturbaciones en el suelo que generarán las ondas impulsivas.

Si el arreglo es con eje de simetría se realiza una medición directa, ejecutando los golpes con la fuente sísmica a un lado del arreglo de geófonos. Luego se cambia la fuente a una posición simétrica y se ejecuta una nueva serie de perturbaciones, que se conoce como medición inversa. Posterior a ello se promedian los registros de cada sensor, el promedio puede ser en tiempo o bien en frecuencia. El criterio de realizar una batería de mediciones a ambos lados del arreglo de geófonos está basada en la mitigación de los efectos producidos por la no homogeneidad del terreno, no horizontalidad de los estratos, y distorsiones en la fase debido a la no

unicidad de la fuente mientras que el promedio de los registros mitiga el ruido existente en cada una de las mediciones, mejorando la razón señal-ruido.

Si el arreglo es con fuente fija se ejecutan las perturbaciones, se promedian los registros de cada sensor para mitigar el ruido (promedio puede ser en tiempo o bien en frecuencia), para mejorar la razón señal-ruido.

3. Una vez registrados los datos para la distancia D , se procede a aumentar la distancia al doble y a realizar la misma cantidad de mediciones recién ejecutadas. Aumentando la distancia y utilizando diferentes fuentes se obtienen curvas de dispersión en un amplio rango de frecuencias, suficientes para realizar la caracterización del terreno bajo el cual se han realizado las mediciones.

Espaciamientos (D) cortos y fuentes débiles generan altas frecuencias, longitudes de onda cortas, y por ende poco alcance en profundidad, mientras que distancias grandes (hasta 60 metros) y fuentes energéticas generan rangos de baja frecuencia, mayor longitud de onda y por ende mayor alcance en profundidad.

El método SASW utiliza solo dos receptores para el registro de las ondas superficiales generadas por la fuente sísmica utilizada en el muestreo. Por ello las pruebas deben repetirse con varias configuraciones en campo: diferente fuente sísmica y diferente arreglo de receptores, con el fin de cubrir diferentes profundidades de investigación. Además, las pruebas deben realizarse en dos direcciones para cubrir los efectos de cualquier fase interna que afecte la instrumentación. La necesidad de repetir las pruebas también se justifica con el propósito de disminuir la influencia del ruido aleatorio o de ambiente (Correia, 2015).

Los datos recogidos luego de realizar las pruebas en campo, son analizados para la determinación de la curva de dispersión basada en las diferencias de fases y coherencia, utilizando un analizador de espectro (Correia, 2015)

Esta metodología influye en el tiempo y costo de mano de obra, debido a la necesidad de repetidas pruebas con configuraciones de campo diferentes. Por lo general toma varias horas completar todo el proceso. Además, puesto que sólo se utilizan dos receptores, no es posible detectar todos los posibles efectos adversos y manejar adecuadamente la adquisición de datos, lo que puede causar errores en los resultados. Estos efectos son la inclusión de las ondas de cuerpo (directo, refracción, reflexión, las ondas P y las ondas de aire), y el aumento de los modos, que se refleja, y las ondas no planas de la superficie. Debido a esto, el control de calidad durante la adquisición y proceso es un período extremadamente difícil y la exactitud de los resultados se puede reducir de manera significativa (Correia, 2015)

2.3.2.5. MASW

El método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) propuesto por Park et al. (1999) (Guarachi, 2013), es uno de los métodos sísmicos de evaluación de la condición elástica del suelo para fines de ingeniería geotécnica (Correia, 2015), usa diferentes cantidades de receptores extendidos en modelos lineales, espaciados a distancias iguales y conectadas a un canal individual de registro generadas a partir de diversas fuentes, analizan la velocidad de propagación de las ondas superficiales con la intención de obtener información sobre la variación de la velocidad de la onda S relacionada con la profundidad de la zona estudiada (López et al., 2008).

El estudio con fuente activa es el más común utilizado. Un martillo bastante pesado usando una placa de impacto, también llamada placa base, la que ayudará a que el punto de impacto fuente perturbe menos el suelo es una buena opción como fuente sísmica, aunque otras fuentes más sofisticadas que pueden entregar más potencia de impacto en tierra puede ser una ventaja, debido a su potencial para generar más y bajas frecuencias (longitudes de onda) de ondas superficiales (Correia, 2015).

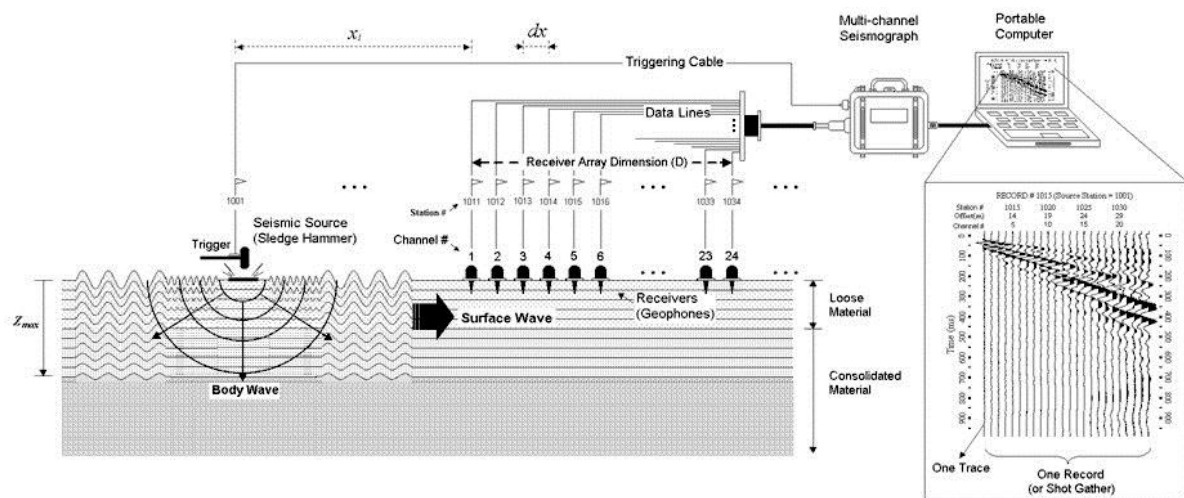


Figura 2.18. Esquema de Ensayo MASW. (ParkSeismic)

La profundidad máxima que puede lograrse en la investigación es usualmente entre 10 a 30 m, pero puede variar de acuerdo al sitio y tipo de fuentes activas utilizadas. Las ondas superficiales mejor generadas son en terrenos planos, con una menor variación topográfica dentro de la una línea en la zona de estudio. Sin embargo, cualquier relieve superficial cuya dimensión es mayor que 10% del largo del arreglo de geófonos, se convertirá en un significativo obstáculo para la generación de superficie de onda (Correia, 2015).

Los geófonos que deben ser utilizados en la implementación de este método deben ser verticales y de bajas frecuencias, como 4,5 Hz. A diferencia de los métodos de

reflexión de ondas sísmicas, una disminución en la frecuencia no es tan crítica ni influye de manera considerable en la sensibilidad de los datos adquiridos (Correia, 2015).

El método MASW a diferencia de los métodos de medición directa de la velocidad de onda de corte, lo cual es notoriamente difícil debido a las dificultades de mantener una razón ruido/señal favorable durante la adquisición y etapas de procesamiento, MASW es uno de los métodos sísmicos más fáciles que entregan resultados competentes. La adquisición de datos es significativamente más tolerante que en otros métodos debido a la facilidad con que se mantiene la razón señal/ruido favorable para la medición. Esta razón señal/ruido es el factor que hace que las ondas de corte superficiales sean las ondas sísmicas más fuertes generadas que pueden viajar distancias mayores que las ondas de cuerpo sin sufrir de contaminación por ruidos externos (Correia, 2015).

La técnica de procesamiento de datos no implica el cálculo de diferencia de fase de las ondas superficiales registradas como en el caso del método SASW. El cálculo de diferencia de fase es propenso a generar resultados erróneos debido al fenómeno de cruce de fases. En su lugar, la técnica calcula velocidades de fase basada en un parámetro de correlación espectral. Por lo tanto, la curva de dispersión calculada puede tener una confianza mucho mayor que el calculado por el método de SASW. La velocidad de cálculo de esta técnica es también más rápida que las de las técnicas empleadas en el método SASW (Correia, 2015).

2.3.2.6. ReMi:

Esta técnica conocida también como sísmica de microtemores (*Refraction Microtremor*), fue propuesto por Louie (2001), y es uno de los métodos más difundidos en la rama de la Ingeniería Civil y constituye uno de los recientes avances entre los métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos y evaluación de terrenos. Este método obtiene información general, en una dimensión, de volúmenes grandes de subsuelo. El fundamento teórico del método es el mismo que las del Análisis Espectrales de Ondas Superficiales (SASW) y de los Análisis Multicanales de Ondas Superficiales (MASW). (Rucker, 2003).

A diferencia de la prueba tradicional de refracción sísmica, anteriormente explicada, ReMi puede usarse sin problemas en ambientes urbanos, y de hecho mientras más ruido haya, funciona mejor. Además, este método puede detectar estratos blandos entre estratos con rigideces mayores, mientras que la técnica de refracción sísmica sólo puede detectar variación de rigideces progresivamente mayores.

Dependiendo de las propiedades de los materiales en el subsuelo, la sísmica de microtemores puede determinar velocidades de cizalla a un mínimo de 40 metros y un máximo de 100 metros de profundidad.

Equipo Usado: El equipo utilizado incluye un dispositivo de refracción digital de 12 ó 24 canales, como geófono verticales y cables de grabación. El grabador debe tener suficiente memoria como para almacenar 12 ó 24 registros de canales con una longitud de al menos 4 segundos más. Generalmente se recomiendan tiempos

de 15 a 30 segundos de registro. La longitud del arreglo total puede variar de 230 a 460 m. Esta longitud tiene un efecto sobre la profundidad de muestreo, el cual es determinar la profundidad en la cual se pueden resolver y precisar las velocidades de las ondas de cizalla. Como una regla experimental, la máxima profundidad de resolución es de caso un tercio a un medio la longitud del arreglo. Una longitud de 230 m asegura una precisión de 15% en las velocidades. No se requiere calibración de la respuesta de amplitud o frecuencia de los geófonos (como sucede en la refracción), la técnica ReMi sólo usa la información de fase en el campo de onda registrado (Lazcano, 2007).

Los cables de los geófonos contienen 12 geófonos verticales separados frecuentemente cada 8 a 20 metros. Estos cables se colocan en un sitio del suelo que sea plano y centrado en el objetivo deseado. Los geófonos se pueden colocar en pavimentos finos, de tal forma que exista un buen acoplamiento con el suelo. Para los registros del ruido, una desviación en la línea de 5% de la longitud total no afectará la precisión del 15% en la velocidad del método (Lazcano, 2007).

Adquisición de Datos: En lo que respecta a la adquisición de datos se pueden adquirir de 5 a 10 registros de ruido de fondo, cada uno de 15 a 30 segundos de longitud. El registro debe tener 12 o 24 canales. Se recomienda un intervalo de muestreo de 2 milisegundos para estudios de ondas de cizalla superficiales. Los tiempos de muestreo típicos e intervalos para un evento pueden ser de 6 seg en 0.5 mseg, 12 seg en 1 mseg y 24 seg en 2mseg, para longitudes de arreglos de 60 pies, 120 pies y 240 pies, respectivamente. Adicionalmente se debe colocar una frecuencia de corte igual a la mitad de la frecuencia de muestreo, con el objetivo de evitar el fenómeno de aliasing (efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestran digitalmente). Los geófonos de alta frecuencia de resonancia se usan para arreglo más cortos, con profundidades de investigación más superficiales, y los geófonos de baja frecuencia se usan para arreglos más largos, con profundidades de investigación más profundas. De acuerdo a Louie (2001), se puede lograr una profundidad de investigación de casi 100 m o más usando un arreglo de 200 m. Para líneas más cortas, con una resolución mejorada cercana a la superficie, los espaciamientos de 3 m entre geófonos con un arreglo de 360m, tienen una profundidad de investigación mínima de 9 a 12m. Se debe esperar por el paso de una buena fuente de ruido como un tren, camiones pesados, o un avión de vuelo bajo. Si el sitio es tranquilo, se debe activar algún tipo de fuente durante cada registro (Mercedes & Montenegro, 2005).

2.3.2.7. ESAC

Se trata de una modificación del método inicial SPAC (Aki, 1957) y se basó en estudiar las características del ruido ambiental en la superficie del suelo, tanto en tiempo como en el espacio.

Las velocidad verticales registradas por sensores en distintos puntos en la superficie, durante un periodo de tiempo, son consideradas en este método como ondas superficiales que satisfacen una ecuación de onda definida en el tiempo y

en el espacio, y a la vez, como muestras de un fenómeno estocástico estacionario en el tiempo y en el espacio (Cintas, 2013).

Sin embargo una de las limitaciones más significativas para la aplicación en áreas urbanas de este método, es la señalada en el punto 3, referida a la necesidad de arreglos circulares. Es así que a comienzos de los años 90 esta restricción fue superada por Ling y Okada, al desarrollar el método de auto correlación espacial extendida ESAC. En este método se modifican los argumentos de Aki, para que el promedio azimutal de las razones de auto correlación espacial pueda ser calculado directamente, a partir de la transformada de Fourier de las señales, y representa el espectro cruzado normalizado entre las señales de un sensor central (Sensor 0) y los sensores perimetrales (Sensor n, del 1 al N) (Jose Tomas Errazuriz, 2012)

A continuación se presenta un caso de aplicación del método ESAC que ilustra bien el proceso a seguir y el fundamento que permite obtener la velocidad de onda de corte de los estratos del suelo, a partir de la curva de dispersión (Cintas, 2013).

Es así que en el año de 1997, se efectuó una medición de ruido ambiental aplicando el método ESAC en un sitio en Tokio, el cual contaba con una medición de perfil de velocidades de ondas de corte en el suelo, obtenido con un PS-logging (Ensayo tipo Down-Hole) realizado en un sondaje de 49 metros. Estos resultados se presentan en la tabla 2.3.

Capa	Espesor (m)	Densidad	Vp	Vs
1	5,65	1,40	230,00	130,00
2	6,35	2,00	620,00	380,00
3	6,00	2,00	880,00	460,00
4	8,70	2,00	1770,00	460,00
5	8,90	2,00	1770,00	430,00
6	7,40	2,10	1920,00	520,00
7		2,10	1920,00	600,00

Tabla 2.3. Resultados de mediciones de velocidad de onda y densidad realizados en un sondaje para estudiar en método ESAC (Ohori et al., 2002)

El conocimiento del perfil de velocidades y de que el sitio presenta estratos horizontales en profundidad, permite generar un modelo teórico de las velocidades de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia, considerando su modo fundamental y modos superiores. Estos modelos teóricos son formulados a partir de las ecuaciones de ondas superficiales en medios estratificados horizontalmente, por lo que es claro que esto impone una limitación que consiste en que los estratos bajo el área del arreglo deben ser horizontales y no presentar heterogeneidades laterales (Jose Tomas Errazuriz, 2012).

Adicionalmente a esto, es necesario saber que debe realizarse una configuración del arreglo de sensores, para obtener la medición correcta de las frecuencias. Cabe

destacar también, que entre más tiempo de la medición, con más certeza se cumple el supuesto de ondas generadas por fuentes distribuidas aleatoriamente.

En la siguiente Figura 2.19, se observa la curva de dispersión obtenida con la medición del arreglo de sensores y la dispersión teórica para el modo fundamental y el primer modo de la onda Rayleigh, que se logra a partir del conocimiento del perfil de velocidades del subsuelo mediante exploraciones existentes (PS-logging, Figura 2.19.)

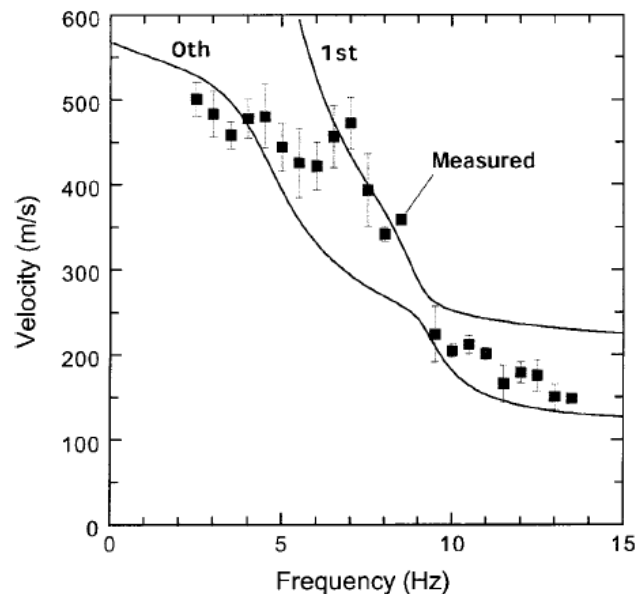


Figura 2.19. Comparación entre datos medidos con método ESAC y curvas de dispersión teóricas para dos modos de vibrar de la onda Rayleigh, a partir de velocidades de onda conocidas por ensayo PS-logging en el mismo sitio (Ohori, M., A. Nobata, and K. Wakamatsu, 2002)

En la Figura anterior se revela una característica muy importante, que es la influencia de modos superiores de la onda Rayleigh. Se observan bandas de frecuencia en donde domina el modo fundamental, donde domina el primer modo y donde ocurre una transición. La característica anterior, tiene importantes implicancias en la inversión a realizar.

La inversión es el proceso por el cual, al no saber nada sobre los estratos en profundidad, se busca un modelo de velocidades de onda de corte que reproduzca teóricamente la curva de dispersión observada. Sin embargo, el término teórico implica considerar el modo fundamental teórico o el primer modo teórico, etc. En el caso mostrado, es claro que un proceso de inversión que solo considere ajustar un modelo teórico del modo fundamental de las ondas Rayleigh induciría a una solución errónea.

Por otro lado, un proceso de inversión realizado a partir de un desconocimiento total del subsuelo y considerando varios modos de vibrar de la onda Rayleigh desemboca en una gran complejidad.

La dificultad de realizar una inversión sin conocer nada sobre el subsuelo es evitada en este estudio, al conocer claramente el perfil del estrato, por lo que la inversión en este caso parte con un modelo de suelo inicial muy parecido al real.

De esta forma, se demuestra en este estudio la capacidad del método ESAC de reflejar la estructura del subsuelo y la capacidad de la formulación de velocidad aparente, que permite considerar modos superiores en un proceso de inversión.

Cabe señalar que entre más información se tenga sobre el depósito de suelo a estudiar, mejores serán los resultados de la inversión, ya que el proceso de inversión corresponde a un problema de optimización que se busca minimizar la diferencia de la curva de dispersión teórica, basada en modelos de depósito supuestos, y la curva real. Luego entre menos información, mayores son las posibilidades de modelos de suelo y el problema de optimización se complejiza y adquiere cada vez más mínimos locales que dificultan la determinación del mínimo global.

Unos ejemplos de dificultad superada, es que el método SPAC requiere un arreglo de sensores circular con un sensor en el centro, de diámetro de cientos de metros para tener perfiles de cientos de metros de profundidad también, por lo que esta geometría muchas veces no es posible de conseguir en medios urbanos. Ante esto el método ESAC resulta ser una buena alternativa, al aceptar arreglos de sensores con geometrías parecidas a las calles de una ciudad.

También, en el contexto de facilitar las mediciones en áreas urbanas, al incluir un sensor triaxial al centro de un arreglo circular, existe la posibilidad de disminuir drásticamente el diámetro del arreglo de sensores para poder alcanzar profundidades significativas de medición (Ochoa, 2007).

3. METODOLOGÍA

3.1. Generalidades

En base a los objetivos que se han propuesto al realizar este proyecto de titulación, se ha procedido a realizar el estudio para caracterizar el suelo de tres diferentes lugares que forman parte del centro histórico de la ciudad de Cuenca, utilizando prospección geofísica y sísmica de refracción, a fin de determinar las condiciones y características del suelo y obtener los parámetros geotécnicos necesarios que podrían ser utilizados para conocer la capacidad soportante del suelo, profundidades de estratos etc.

Sin embargo, nuestro estudio no solo rige en este ámbito, puesto que lo que hemos querido lograr al realizar este trabajo, es establecer criterios bien establecidos para comparar resultados que han obtenido y han utilizado profesionales de experiencia, con ensayos mecánicos ampliamente utilizados hace algunos años y que se siguen utilizando en la actualidad para caracterizar suelos de diferentes condiciones y tipos, y comprobar la validez de la prospección geofísica y la sísmica de refracción al caracterizar suelos del tipo heterogéneo y cómo estas nuevas herramientas han resultado ser muy válidas a la hora de analizar resultados como los ya mencionados anteriormente, y ver la exactitud de estos.

Caracterizar un suelo en el centro histórico de la ciudad, es diferente que hacer el mismo análisis en otros lugares, considerando principalmente la geología que podemos encontrar en esta parte de la ciudad, con su correspondiente litología, es por esta razón que el estudio se realizó en el centro histórico de Cuenca, y aunque la mayor parte de este sector de la ciudad se encuentra saturado urbanísticamente, es necesario establecer criterios e indicativos reales que nos permitan concluir las diferencias o semejanzas que se ha obtenido utilizando métodos geofísicos y sísmicos analizando suelos con la estructura geológica normal que encontramos en esta parte de la ciudad.

En una investigación y recopilación de información bibliográfica, se ha podido obtener información directa de profesionales dedicados a la mecánica de suelos y geotecnia, que han realizado este mismo estudio (caracterización de suelos mediante métodos tradicionales) en dos de las tres líneas que hemos realizado para la recopilación de información mediante métodos geofísicos y refracción sísmica, dejando una línea de estudio como un análisis especial, en donde la geología local presenta un cambio brusco de material.

3.1.1. Equipo utilizado

Para el desarrollo de las actividades de prospección geofísica y su procesamiento, utilizamos los siguientes equipos:

- ✓ Sismógrafo PASI modelo 16SG24-N (*Equipo combinado: sismógrafo y tomógrafo eléctrico*).
- ✓ Accesorios para sismica de refracción y prospección geofísica:
 - 2 Cables sísmicos de 130 m, 12 canales.
 - 24 geófonos verticales de 10 Hz.
 - 1 Geófono starter.
 - 2 cables de 200 m. para geófono starter.
- ✓ Equipo complementario:
 - Vehículo Mahindra Pick UP C/D 4x4.
 - GPS Garmin.
 - Cámara fotográfica Olympus SP-565UZ.
 - Herramientas múltiples.



Figura 3.1. Equipo utilizado para la recopilación de información geofísica y sísmica

3.2. Área de estudio

El área de estudio se centró básicamente en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, capital de la provincia del Azuay, ubicada en el sur del Ecuador, como se puede observar en la figura 3.2. En total se realizaron 3 líneas de estudio, ubicados en distintos puntos del centro de la ciudad, con características geológicas propias del sector. Estas tres líneas de estudio se observarán a detalle en cada uno de los planos que se encuentran en el anexo A.

a)



b)



c)

Zona del Proyecto

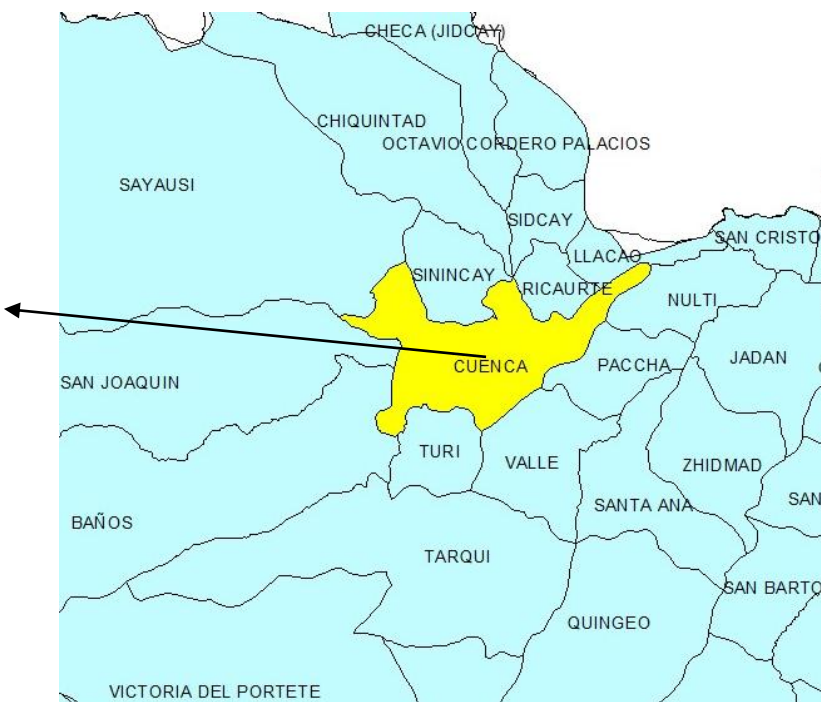


Figura 3.2. Mapa de ubicación de la zona del proyecto: a) Provincia del Azuay, b) Cantón Cuenca, c) Clasificación Parroquial.

Se ha delimitado el área de estudio en las coordenadas 721000 - 9680850, 722835 - 9680850, 722835 - 9679208 y 721000 - 9679208.

Este estudio se realizó utilizando el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator System (U.T.M.), zona 17, banda M, DATUM, W84.

En la tabla 3.1. se observa los lugares donde se extendieron las 3 líneas, conjuntamente con la formación y litología propia del lugar de acuerdo a la geología local, adicionalmente se ha analizado y verificado en el campo la información recopilada en el mapa geológico de Cuenca-Azogues.

Código	Ubicación	Geología	Litología
Línea 1	Borrero y Pío Bravo	Límite entre formaciones compuestas de Arcillas Varvadas y Terraza Glacial nivel 3	Prevalecen la cantidad de limos y limolitas y en cantidad menor de clastos heterogéneos, según la geología del sector
Línea 2	Padre Aguirre y Presidente Córdova	Terraza Glacial	Clastos heterogéneos
Línea 3	Colegio Manuel J. Calle	Arcillas Varvadas	Limos y limolitas estatificados

Tabla 3.1. Ubicación, geología y litología de las 3 líneas de estudio.

3.2.1 Geología

Se pudo identificar en los lugares que se realizaron las pruebas geofísicas dos tipos de formaciones: Terraza Glacial y Arcillas Varvadas, como se podrá evidenciar en el anexo A y se mostró anteriormente en la tabla 3.1. las características geológicas y litológicas del suelo en los cuales se realizó la caracterización del suelo en estudio.

❖ **Arcillas Varvadas Qv:**

Las arcillas Varvadas son de origen lacustre, su edad geológica se remonta al pleistoceno. Un depósito de arcillas, limos y limolitas finamente estratificados de color habano claro a habano oscuro, oxidados y fragmentados se ubican al norte del cantón Cuenca, la estratificación que presenta es de origen estacional. Con respecto al comportamiento geotécnico, estas arcillas son sensibles a la saturación y al remoldeo, en estado seco este suelo tiene una tendencia de mediana a baja consistencia, y de acuerdo a la geología local, parecen estar cubiertos por un residuo delgado de terraza. Además, presenta baja resistencia al corte, paralelamente a la estratificación y aún más en estado húmedo. Son depósitos incompetentes y presentan alta expansibilidad.

El rango de susceptibilidad al movimiento del suelo de las arcillas varvadas se encuentra entre mediano y alto. En estado seco es deleznable y colapsable en pendientes bajas a moderadas, en estado saturado y con sobrecarga. Para cimentaciones se recomienda reemplazo de suelos, para muros de contención control de drenaje superficial y subterráneo.

1-2-3

❖ **Terrazas Glaciares m**

Este tipo de depósitos de material grueso y heterogéneo se derivan básicamente de corrientes del flanco Este de la Cordillera Occidental, la edad de este tipo de depósitos corresponden al período Cuaternario.

Se dividen en dos tipos:

a) Terrazas de Piroclásticos:

“Se presentan a ambos lados del curso bajo del Río Cuenca, formando las mesetas del Pachamama y la meseta de El Plateado”

b) Terrazas Fluviales:

“Las terrazas glaciares son el resultado de la acción de los ríos del valle de Cuenca, sobre los depósitos de edad glacial. Estos ríos son: Machángara, Tomebamba, Yanuncay y Tarqui.”

Relacionando la edad de las terrazas que se observa en el mapa geológico de la ciudad de Cuenca, se pueden clasificar de la siguiente manera:

“Las más altas y más antiguas se ubican al Norte del río Tomebamba y las más bajas y recientes se ubican entre el río Tomebamba y Tarqui, atravesada por el río Yanuncay, esta última se clasifica con la simbología ⁵ m” (Vélez Dávila, 2012)



Tenemos los siguientes niveles de terrazas empezando desde la más alta:

Nivel 1: Corresponde a la meseta de acumulación glacial.

Nivel 2: Área comprendida entre Av. de las Américas y la iglesia de Cristo Rey.

Nivel 3: Área comprendida entre Av. Héroes de Verdeloma y Calle Rafael María Arízaga.

Nivel 4: Corresponde al núcleo de la ciudad.

Nivel 5: Son las terrazas bajas y por ende las más extensas.

3.2.2 Tipos de Suelos

❖ Arcillas Varvadas:

Las Arcillas Varvadas presentan un alto contenido de finos, se caracterizan por tener aproximadamente el mismo espesor consecutivamente. Las varvas son capas estrictamente formadas durante una ciclicidad anual, estas se forman durante los procesos de congelamiento y descongelamiento de la superficie de los lagos originados de la fusión glacial. La resistencia al corte a lo largo de las varvas horizontales son mucho menor que transversalmente. La conductividad hidráulica es mayor en la dirección horizontal que vertical (Mitchell y Soga, 2005).

❖ Terraza Glaciar:

Entre algunas características texturales de los depósitos glaciares, sobresale el amplio contenido de clastos redondeados e imbricados. Predominan clastos y gravas con matriz areno-limosa que va de un color café claro a amarillo, y generalmente se encuentran como depósitos heterogéneos.

Al ser depósitos heterogéneos, son muy variables en sus características físicas, pues tienen una porosidad y permeabilidad considerable y diferente, y en lo que al agua subterránea se refiere, se encuentra cerca de la superficie (Hürlimann, 2009).

3.3. Recopilación de información de estudios geotécnicos realizados en el centro histórico de la ciudad de Cuenca que corresponden a las líneas de estudio

Teniendo claro el área de estudio donde se realizaron los levantamientos geofísicos para la caracterización de suelos, es necesario establecer algunos parámetros importantes de cada una de las líneas de análisis comparando a cada una de ellas con el mapa geológico de Cuenca-Azogues (Hoja 53-73), pero a más de ello, tener en consideración la información de estudios geotécnicos tradicionales que fueron realizados anteriormente en dos de las tres líneas levantadas (Línea 2 y Línea 3) en donde se establecieron ciertos parámetros geotécnicos para la remodelación de la Plaza San Francisco y construcción de las aulas del Colegio Manuel J. Calle respectivamente, dejando a la primera de las tres líneas realizadas (Borrero y Pío Bravo), como un estudio efectuado en esta parte del centro histórico de la ciudad para establecer la caracterización de los suelos donde se produce un cambio en la formación de estratos (terrazza glaciaria y arcillas varvadas), obteniendo resultados que a primera vista resultarían diferentes, pero que mediante caracterización geofísica y sísmica se podrá llegar a esta conclusión.

Los estudios de las líneas 2 y 3 que a continuación se presentan, se basan en análisis experimentales y estudios geotécnicos realizados por profesionales dedicados a realizar este tipo de estudios mediante ensayos SPT, que han sido constituidos para establecer la composición del subsuelo y las características físicas mecánicas generales de los materiales, como la capacidad portante del suelo, de manera que permita obtener la información requerida para posteriormente comparar con los datos que se han obtenido en nuestro estudio de caracterización geotécnica mediante prospección geofísica y sísmica de refracción.

Es necesario también incluir, el criterio de dos profesionales más dedicados a la construcción, que en base a su experiencia, nos han podido indicar cuál es el valor de q_a (capacidad admisible) que ellos han utilizado, para realizar su obras en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, y también servirán como una base para realizar la comparación anteriormente mencionada.

Uno de los profesionales entrevistados fue el Ing. Julio Piedra, Ex Catedrático de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca. Entre los comentarios realizados por el Ingeniero, en relación a los parámetros geotécnicos que el utilizó en la construcción del Banco Central, localizado en Calle Larga y Av. Huayna-Cápac, y que igualmente corresponde a una geología similar, compuesta por clastos heterogéneos (terrazza glaciaria), estaba un valor de capacidad admisible de 3 Kg/cm², teniendo en cuenta aquel dato, por razones específicas de seguridad, puesto que al no poder realizar ensayos

en cada parte del subsuelo, y reconociendo las diferentes características del mismo, considerando la heterogeneidad que presenta una terraza aluvial, sería un valor conservador, y que se acomodaría en el lado de la seguridad para evitar cualquier problema futuro, sin embargo mencionó la importancia de realizar ensayos adicionales, para una mejor aproximación y así evitar el sobredimensionamiento de una cimentación que concluiría en un mayor inversión y menor ganancia para el constructor.

Con esto en mente, a continuación se procederá a realizar una descripción completa del suelo en estudio para cada una de las líneas de estudio, sabiendo claramente las características generales del mismo en base a las propiedades litológicas que se encuentran en el sector.

3.3.1. Línea 1 (Borrero y Pío Bravo)

Bien se puede evidenciar en el anexo A, que la primera línea de estudio corresponde al límite entre los depósitos de arcillas varvadas y terraza glaciaria, en este caso particular, el estudio geofísico que se ha realizado, se comparará con la geología local que se observa en la carta geológica de Cuenca-Azogues, estableciendo algunas características importantes que se han evidenciado en la caracterización del suelo en estudio, así como también los resultados geotécnicos que se han obtenido, evidenciando de esta forma el comportamiento geotécnico de un suelo cuando se encuentra en el límite entre dos depósitos de período cuaternario y edad pleistocena.

Los resultados de la caracterización geotécnica realizada mediante geofísica y sísmica de refracción de la primera línea se mostrarán posteriormente en el inciso 3.5.

3.3.2. Línea 2 (Padre Aguirre y Presidente Córdova)

El estudio realizado en esta segunda línea de análisis, fue hecho con la finalidad de establecer las características físico-mecánicas generales de los materiales sobre los cuales se cimentarían las estructuras proyectadas para la remodelación de la plaza San Francisco, estudios constituidos y realizados en el año 2011.

3.3.2.1. Estudio del Suelo de Fundación

El suelo de fundación de la línea 2, presenta características litológicas homogéneas en toda su extensión, y corresponden básicamente a depósitos sedimentarios de origen aluvial con componentes fluvio-glaciáricos, cubiertos por suelos residuales, que en el área de estudio tienen un espesor de 6 a 6.5m.



“El material aluvial, corresponden a cantos rodados de esfericidad media medianamente compactos en una matriz areno limo arcillosa. Los suelos residuales, están constituidos mayoritariamente por limos inorgánicos de alta compresibilidad, de consistencia media a dura, y están pre-consolidados.” (Ordoñez, 2011).

Con los sondeos que se han realizado se ha determinado la consistencia de los depósitos cohesivos mediante ensayos SPT, y una serie de plan de ensayos de laboratorio realizados para la caracterización del suelo en estudio correspondiente a esta línea de análisis (Anexo B).

3.3.3. Línea 3 (Colegio Manuel J. Calle)

El presente estudio de suelos que corresponde a esta línea de análisis fue realizado con la finalidad de presentar parámetros importantes para el diseño de la cimentación de nuevas aulas para el Colegio Manuel J. Calle, el mismo que establecer la composición del subsuelo y las características físico-mecánicas generales de los materiales que servirían para soportar la vivienda construida en el lugar de emplazamiento del proyecto. Este estudio fue realizado en el año 2012.

3.3.3.1. Estudio del Suelo de Fundación

El proyecto se encuentra ubicado en la parroquia el Vecino del Cantón Cuenca, entre las calles Mariano Cueva, Francisco Calderón, Margarita Torres y Eugenio Espejo. Localmente se encuentra emplazado sobre depósitos lacustres de origen glacial, estratificado en finas capas alternantes de limos y arcillas de edad pleistocena, conocida con el nombre de arcillas varvadas.

Geotécnicamente el suelo de fundación en su mayoría lo constituye limos inorgánicos de alta compresibilidad, que de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS se los cataloga como MH. La consistencia varía de blanda para los primeros 1.50m de profundidad a dura por debajo de los 4.50m.

Con los sondeos realizados, se ha determinado la consistencia de los depósitos cohesivos mediante ensayos SPT, también se procedió a la toma de muestras mediante la utilización de muestreadores de tubo partido. Con estas muestras obtenidas en campo, se procedió se realizó un plan de ensayos de laboratorio, este plan de ensayos, conjuntamente con los resultados que se han obtenido, se registraron en el anexo B.

3.4. Descripción de los ensayos en campo

Para el trabajo en campo se realizaron tres tipos de registro: un ensayo activo mediante una línea MASW y dos ensayos pasivos mediante una línea ESAC y una línea REMI.

El procedimiento en terreno para adquisición de datos es la siguiente:

Ensayos activos: Para los registros de datos mediante la línea MASW, se procedió con la instalación de 24 geófonos colocados linealmente a 1 metro y a 1.5 metros dependiendo del espacio de cada zona siguiendo con impactos de martillo en una placa de acero a distintas distancias estos son conocidos como “shots”(7 shots), y para cada una de ellas el golpe se debe repetir un cierto número de veces (5 veces). Ya que no existe control sobre el ruido generado por fuentes ambientales que puedan afectar la señal registrada, ni tampoco hay control sobre el rango de frecuencias de las ondas generadas, la repetición de golpes para una misma distancia permite la posterior combinación, El tiempo de registro debe ser lo suficientemente largo para registrar el paso de la onda originada por el golpe hasta el último geófono.



Figura 3.3. Configuración para la ejecución de ensayos activos (MASW y Refracción Sísmica), Línea 3

Ensayos Pasivos: Para la línea ReMi se utilizó el mismo arreglo lineal de la línea MASW, con ello se registran largos períodos de tiempo las vibraciones ambientales para el registro de datos correspondientes.



Figura 3.4. Configuración para la ejecución del ensayo ReMi. Línea 3

Para la línea ESAC se modifica la configuración de ubicación de geófonos, utilizando dos líneas perpendiculares entre sí, para este ensayo se utilizan 12 geófonos en total separados a 2 y 3 metros, de igual manera se registran largos periodos de tiempo las vibraciones ambientales para el registro de datos correspondientes.



Figura 3.5. Configuración para la ejecución del ensayo ESAC. Línea 1

El conjunto de registros obtenidos de la realización del ensayo son recolectados, visualizados, revisados y almacenados por el equipo geofísico PASI, descrito anteriormente.

3.5. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

A partir de la información registrada en los ensayos geofísicos en el campo se procede a la determinación de los valores de las velocidades de onda de corte V_s y velocidades de ondas de compresión V_p . Estos resultados para las diferentes zonas de estudio se pueden ver en los anexos H e I.

3.5.1. Determinación de las velocidades V_p

Se procesa la información geofísica obtenida del ensayo MASW mediante el análisis de sísmica de refracción, en este análisis se obtendrán los valores de las velocidades V_p haciendo uso del software WINSISM.

Para el análisis en el software WINSISM, es necesario determinar el instante en que se originan las ondas (tiempo cero) registrado dentro del expediente de pulsos de llegada. Cada expediente consta de un conjunto de registros individuales provenientes de cada geófono. A un registro individual se le denomina *traza*, y al conjunto de trazas se le denomina *sismograma*. La primera llegada o primer arribo consiste en el tiempo que tarda la onda en viajar desde la fuente a cada receptor (ver figura 3.6).

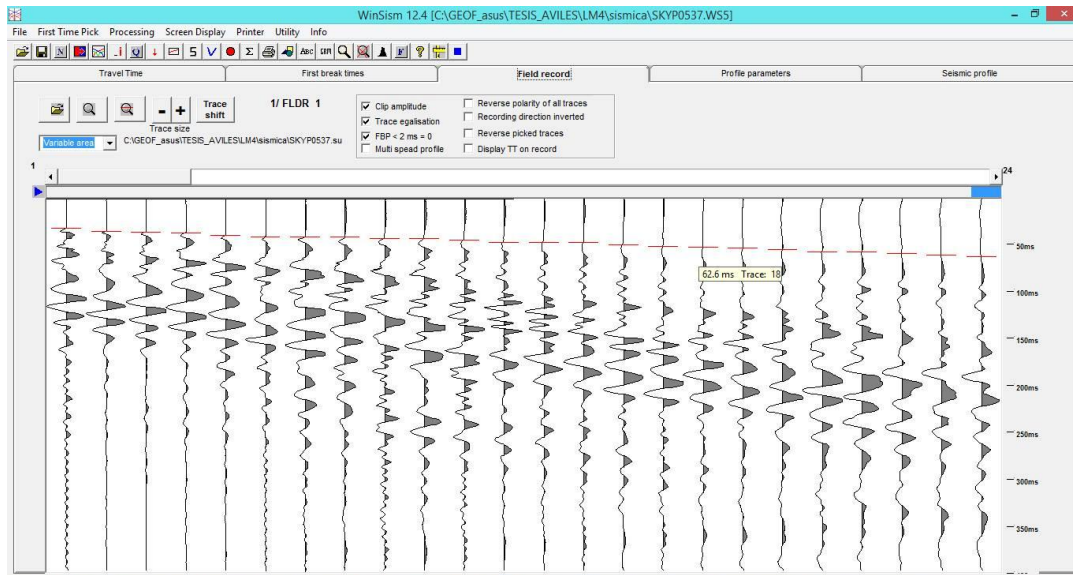


Figura 3.6. Detección de los primero arribos del registro sísmico para el primer shot, Línea 3

Durante el procesamiento de los datos contenidos en un expediente, estos son manipulados para ser presentados en un formato gráfico llamado curva tiempo-distancia o domocrónica (ver figura 3.7) correspondientes a cada uno de los disparos (Shots) generados cuya forma está relacionada con las condiciones geológicas del lugar en estudio. Este gráfico es el punto de partida para determinar la variación de la velocidad de las ondas con respecto a la profundidad alcanzada durante el desarrollo de un ensayo de refracción. Las velocidades calculadas están relacionadas a la identificación y cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad.

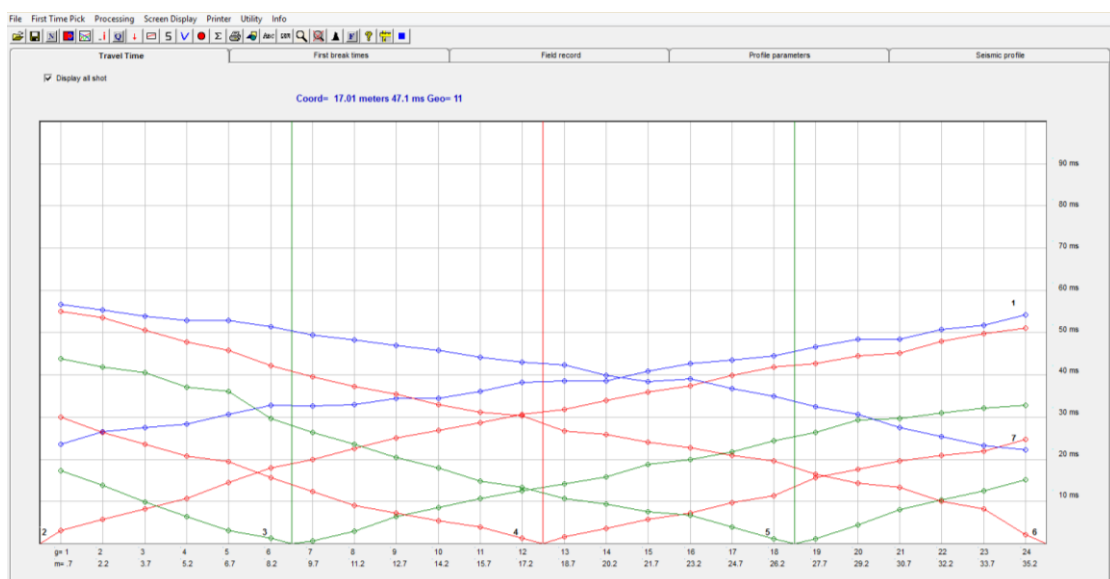


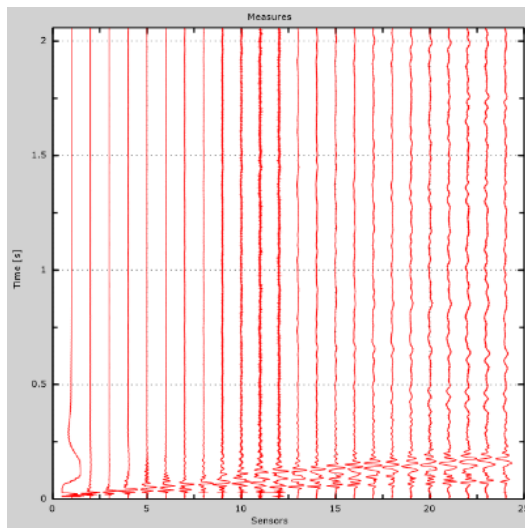
Figura 3.7. Curvas tiempo-distancia “Domocrónicas”, Línea 3.

Para la determinación del espesor de los estratos identificados WINSISM utiliza el Método de tiempo de intercepción y Método de distancia crítica.

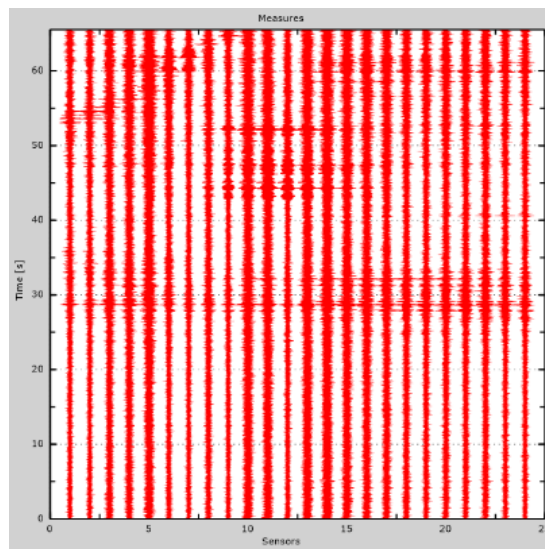
3.5.2. Determinación de las velocidades V_s

La información geofísica obtenida a partir de las líneas MASW, ReMi y ESAC realizadas en campo, será procesada en el Software MASW. El software MASW utiliza el método homónimo para determinar el perfil de velocidad de las ondas de corte V_s , así como también el tipo de suelo, según las normativas de las técnicas nacionales e internacionales.

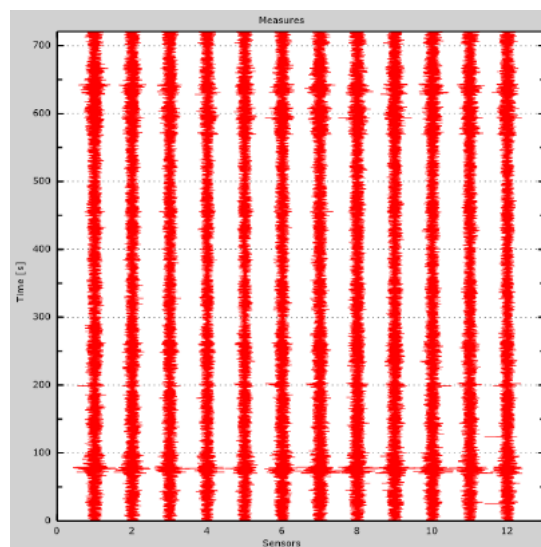
Para el análisis en el software MASW, primero es necesario clasificar y escoger los sismogramas para cada método utilizado (MASW, ReMi y ESAC).



a)



b)



c)

Figura 3.8. Sismogramas: a) MASW, b) ReMi, c) ESAC.

A partir de los sismogramas el software Masw obtiene una curva de dispersión de cada uno de los métodos (MASW, ReMi, ESAC).

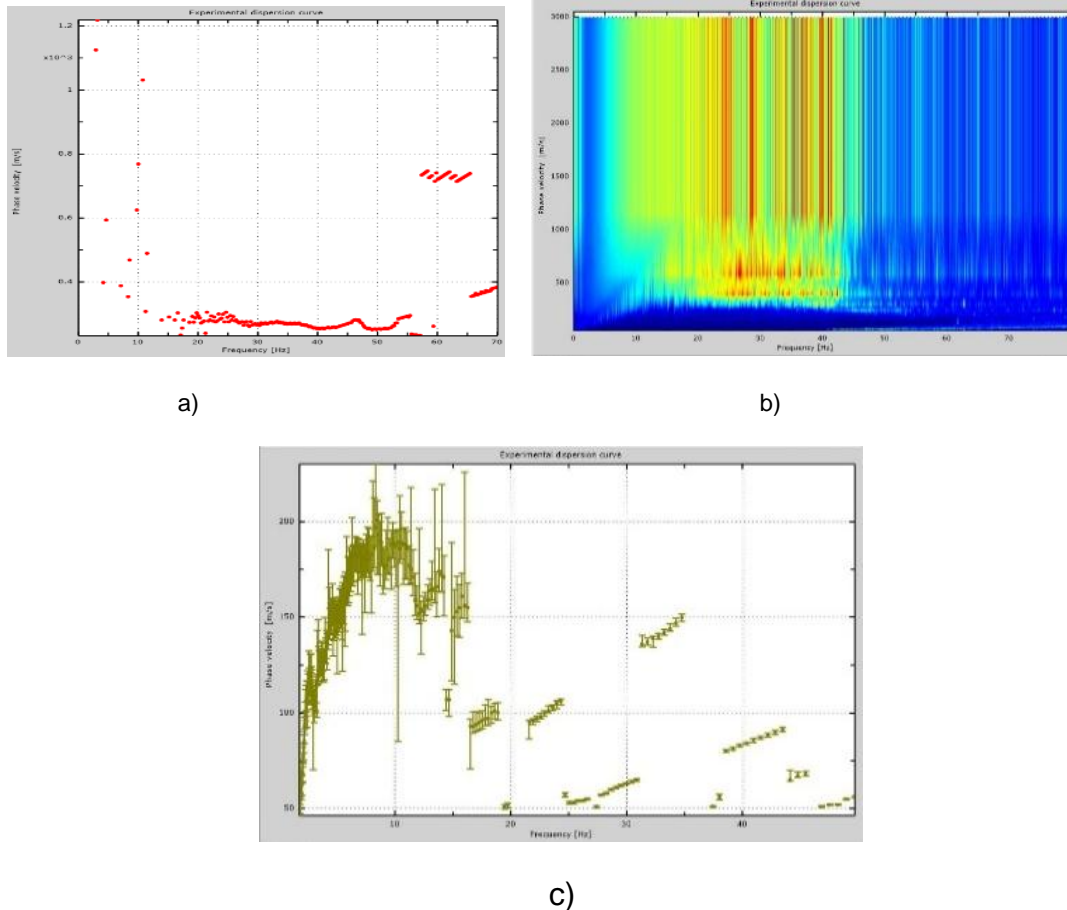


Figura 3.9. Curvas de dispersión, a) MASW, B) ReMi, c) ESAC.

3.5.3. Combinación de Técnicas

Tal como se puede observar en la curvas de dispersión de las figuras 3.9, las curvas obtenidas con los ensayos pasivos y activos con fuentes de baja energía (martillo), pueden ser insuficientes para la exploración de grandes profundidades por sí solos. Para lograr una mayor exploración en profundidad, (utilizando un equipamiento “estándar”, sin fuentes de gran energía, es necesario combinar las curvas de dispersión obtenidas con distintos métodos, y así aumentar el ancho de banda de las frecuencias exploradas. En general, este procedimiento amplía el rango de frecuencias para el que se dispone de información necesaria, y con ello, la profundidad de exploración.

Si bien, los ensayos activos son considerados de alta confiabilidad debido a que se conoce a priori la dirección del frente de propagación de ondas y la ubicación de la fuente, en muchas situaciones, si no se dispone de una fuente de gran energía, la curva de dispersión obtenida estará limitada a longitudes de ondas muy cortas. Por ello, es común que se recurra a ensayos pasivos para explorar frecuencias más bajas.

Con el software MASW, se puede combinar las curvas de dispersión de los tres métodos realizados en campo (MASW, ReMi y ESAC). Obteniéndose una curva de dispersión única con un mayor rango de frecuencias como se muestra en la figura 3.10.

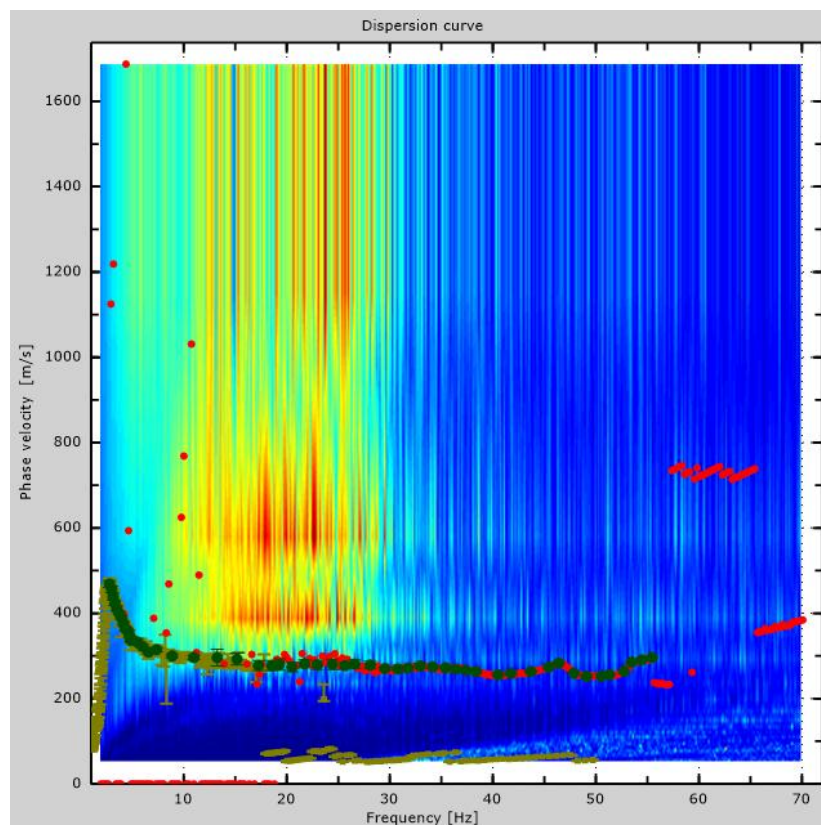


Figura 3.10. Combinación de curvas de dispersión.

A partir de los resultados de la curva de dispersión o autocorrelación el software sigue con el proceso de inversión.

La inversión no es un proceso trivial, ya que existen muchos modelos de suelo que se ajustan a las observaciones de terreno observado (Guarachi, 2013)

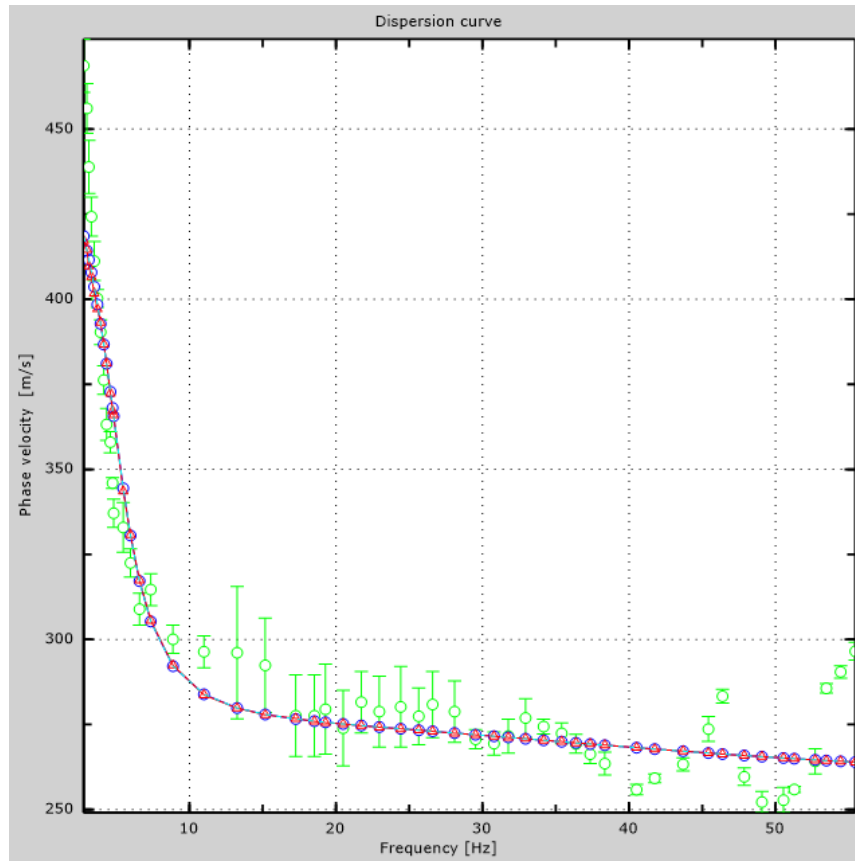


Figura 3.11. Curva de dispersión ajustada para la línea 3.

La idea general de la inversión, es calcular las curvas de dispersión o autocorrelación asociadas a modelos de estratos horizontales de suelo (problema directo), y utilizando algún algoritmo de búsqueda, encontrar el modelo que tenga el mayor ajuste con las observaciones de terreno (problema inverso). Como se mencionó en la sección 2.3.2, el problema de inversión es un proceso de optimización que busca minimizar:

$$Error = Min(V_{observada} - V_{teorica})$$

Este proceso nos proporcionan los estratos que conforman el subsuelo, clasificados por velocidad V_s como se muestra en la figura 3.12.

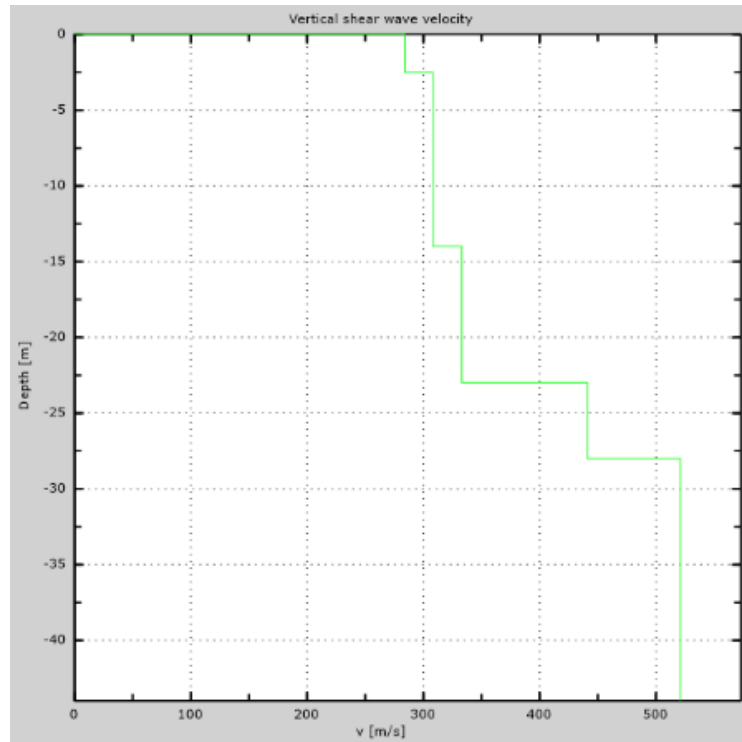


Figura 3.12. Perfil de Vs para la línea 3.

3.6. Determinación de Parámetros Geotécnicos.

De las técnicas sísmicas se obtiene la velocidad de propagación de las ondas sísmicas (V_s y V_p) a través del terreno, con estos valores es posible calcular las propiedades elásticas dinámicas del suelo para los diferentes estratos detectados: el coeficiente de Poisson dinámico, el módulo de corte dinámico, el módulo edométrico dinámico, el módulo de elasticidad dinámico y el modulo volumétrico dinámico.

Para obtener los parámetros dinámicos se emplean las siguientes expresiones derivadas de la teoría de la elasticidad:

- **Módulo de corte y el módulo edométrico**

El módulo de corte G , y el módulo edométrico E_c , están directamente relacionados con las velocidades V_s y V_p por las siguientes expresiones:

$$G_{din} = \rho V_s^2 \quad (KN/m^2) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$E_{c_{din}} = \rho V_p^2 \quad (KN/m^2) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde ρ : densidad de masa dada por $\rho = \gamma/g$.

- **Coeficiente de Poisson**

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right)} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

- **Módulo de Young**

$$E_{din} = E_c(1 + \mu)(1 - 2\mu)/(1 - \mu) \quad (KN/m^2) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$E_{din} = 2(1 + \mu)G \quad (KN/m^2) \quad \text{Ecuación 3.5}$$

- **Modulo volumétrico (Bulk)**

$$K_{din} = \frac{E_{din}}{3(1-2\mu)} \quad (KN/m^2) \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Los valores de módulo presentados, son valores dinámicos, diferentes a los estáticos que son obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Los valores dinámicos, suelen ser superiores a 10 o más veces los estáticos (Aguay & Dranichnikov, 2015).

Las principales razones que generan grandes diferencias entre los valores Dinámicos y Estáticos son:

- Los suelos no son un medio elástico ideal
- Diferencia significativa de las presiones bajo las cuales se determinan los parámetros estáticos y dinámicos
- Gran diferencia de los tiempos de acción de las cargas.
- Diferencia en el carácter de la acción de las tensiones actuantes.
- Los suelos son materiales heterogéneos
- Diferencia de las dimensiones de las muestras de suelos que participan en cada medición.

La utilización de la prospección sísmica para valorar los módulos estáticos, es posible solo con la utilización de una serie de relaciones de correlación, Muchas investigaciones en diferentes regiones de la ex URSS proponen algunas de las correlaciones para el módulo de Young Estático se muestra en el tabla 3.2.

$E_{est} (kg/cm^2)$	Descripción
$0,08539E_{din} + 30$	En suelos arenosos con humedad natural que yacen de 2 a 2,5 m sobre el nivel freático
$0,0445E_{din} + 31$	Para suelos arenosos que yacen 0,5m bajo el nivel freático
$0,08176E_{din} - 46$	Cerca del nivel freático (NF-2,5m<Z<NF+0,5)
$0,1116E_{din} - 42$	En suelo Saprolíticos de los Urales que yacen sobre el nivel freático
$0,09346E_{din} + 4$	Suelo areno -arcilloso que yacen sobre el nivel freático
$0,045E_{din} + 70$	Suelos limosos no saturados tipo Loess

Tabla 3.2 Fórmulas empíricas para determinar el Módulo de Young estático (Aguay & Dranichnikov, 2015)

Las fórmulas enunciadas para la valoración del módulo de deformación han sido objeto de posteriores comprobaciones independientes con métodos de campo en las diferentes regiones de la ex URSS. Se recomienda utilizar estas fórmulas con mucha precaución para los suelos de otras regiones.

En la mayoría de los casos los resultados son satisfactorios plenamente y su diferencia no sobrepasa del ± 10 a 15% del valor medio del módulo de deformación. Está demostrado que este error en el valor del módulo de deformación en la mayoría de los casos garantiza la exactitud necesaria en los cálculos de asentamiento de los edificios u otras obras.

3.7. Análisis de Capacidad Carga

La capacidad de carga para cimientos someros puede ser descrita en función de la velocidad de las ondas de corte V_s con expresión empírica propuesta por Tezcan et al (2006) mediante una investigación en base a datos de más de 550 sitios de estudio, la cual incluyen datos de SPT, pruebas de laboratorio y prospección geofísica. Esta expresión concuerda con los resultados de la teoría clásica de Terzagui y Peck (Kaptan, 2012).

$$q_a = 0.1 \gamma V_s / n \quad \text{Ecuación 3.7}$$

En donde

V_s : Velocidad cortante (m/s)

γ : Densidad del suelo (kN/m³)

q_a : Presión de carga admisible (kPa).

n : Factor de seguridad

Donde la densidad del suelo se puede calcular mediante la expresión empírica:

$$\gamma = 4.3 V_s^{0.25} \quad (\text{KN/m}^3) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Los factores de seguridad (n), así como la expresiones empíricas de carga admisible que se obtienen después del procesos de calibración de la investigación realizada de las 550 sitios de investigación se muestran en la tabla 3.3.

Tipo de suelo	V_s – rango (m/s)	n	q_a (KN/m ²)
Rocas ‘duras’	$V_s \geq 4000$	$n = 1.4$	$0.071 \gamma V_s$
Rocas ‘blandas’	$750 \leq V_s \leq 4000$	$n = 4.6 - 8.10^{-4} V_s$	$0.1 \gamma V_s / n$
Suelos	$V_s \leq 750$	$n = 4.0$	$0.025 \gamma V_s \beta$

Tabla 3.3. Factores de seguridad para suelos y rocas

En donde los valores propuestos de este factor de corrección β para diferente anchura de la cimentación B , son las siguientes:

$$\beta = 1.00 \quad \text{para } 0 \leq B \leq 1.2m$$

$$\beta = 1.13 - 0.11B \quad \text{para } 1.2 \leq B \leq 3.00m$$

$$\beta = 0.83 - 0.01B \quad \text{para } 3.00 \leq B \leq 12$$

Para determinar valores directos se pueden asumir valores de c y ϕ de acuerdo al tipo de suelo en el sitio de estudio. Esta selección de los valores de c y ϕ debería presentar resultados semejantes entre la ecuación de Terzagui (1943) y la expresión empírica propuesta por Tezcan et al (2006) cuyos valores se propone correlacionar al nivel de la rasante, es decir no se considera el efecto del suelo sobre la cimentación es decir $D_f = 0$, es decir:

$$q_a = (cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma) / F_s \approx 0.1 \gamma V_s / n \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde

c : Cohesión

$D_f = 0$ Profundidad de cimentación

γ : Peso específico del suelo

B : Ancho de cimentación

N_c, N_q, N_γ : Factores de capacidad de carga que son adimensionales y funciones sólo del ángulo de fricción del suelo ϕ .

F_s : Factor de seguridad

Una vez asumido los valores de c y ϕ se puede calcular la capacidad de carga del suelo aplicando la ecuación general de la capacidad de carga de Meyerhof (1963) (Braja M. Das, 2001).

$$q_u = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + \gamma D_f N_q F_{qs}F_{qd}F_{qi} + 1/2\gamma B N_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$F_{cs}F_{qs}F_{\gamma s}$: Factores de forma

$F_{cd}F_{qd}F_{\gamma d}$: Factores de profundidad

$F_{ci}F_{qi}F_{\gamma i}$: Factores de inclinación de la carga

3.8. Análisis de Asentamientos Elásticos.

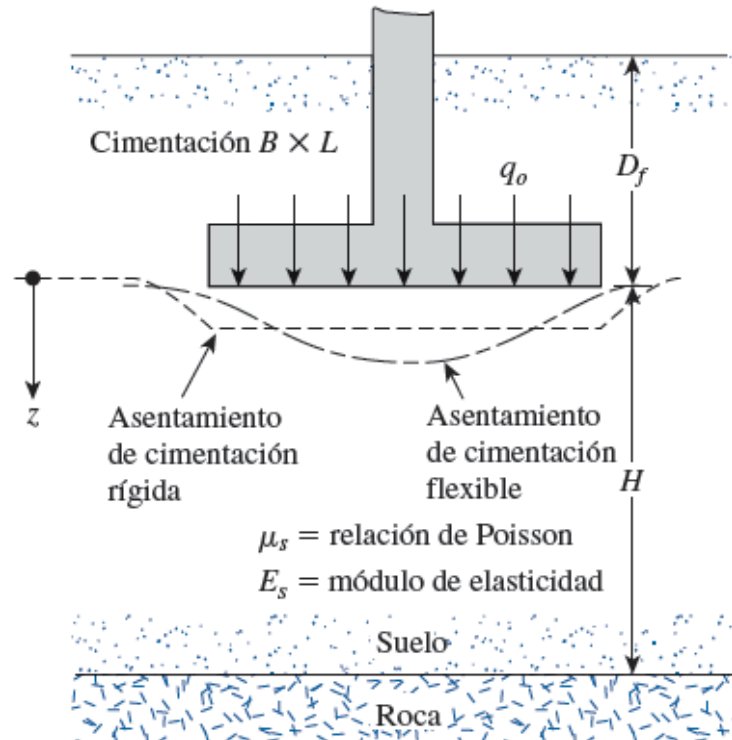


Figura 3.13. Asentamientos elásticos de cimentaciones rígidas y flexibles.

Se supone el suelo en estado de equilibrio elástico, suelo homogéneo, suelo isotrópico, linealmente elástico y las propiedades del suelo se definen con E y μ .

- PARA SUELOS COHESIVOS**

El asentamiento elástico de una cimentación rectangular de dimensiones $B \times L$ se puede calcular utilizando la teoría de la elasticidad:

$$S_e = q_o (\alpha B') \frac{1-\mu_s^2}{E_s} I_s I_f \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde

q_o : Presión neta aplicada sobre la cimentación

μ_s : Relación de Poisson del suelo

E_s : Módulo de elasticidad

B' : $B/2$ Para el centro de la cimentación, B para una esquina de la cimentación

I_s : Factor de forma (Steinbrenner, 1934)

I_f : Factor de profundidad (Fox, 1948); $f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s \text{ y } \frac{L}{B}\right)$

α : Factor que depende de la ubicación sobre la cimentación donde se calcula el asentamiento

Para calcular el asentamiento en centro de la cimentación se utiliza:

$$\alpha = 4 \quad m = L/B \quad n = 2H/B$$

Para calcular el asentamiento en una esquina de la cimentación se utiliza:

$$\alpha = 1 \quad m = L/B \quad n = H/B$$

El factor de forma I_s esta dado por:

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} F_2$$

Los coeficientes F_1 y F_2 se pueden calcular utilizando las ecuaciones de Steinbrenner (1934), en función de m, n.

$$F_1 = \frac{1}{\pi} \left[m \ln \left(\frac{(1 + \sqrt{m^2 + 1}) \sqrt{m^2 + n^2}}{m(1 + \sqrt{m^2 + n^2 + 1})} \right) + \ln \left(\frac{(m + \sqrt{m^2 + 1}) \sqrt{n^2 + 1}}{(m + \sqrt{m^2 + n^2 + 1})} \right) \right]$$

$$F_2 = \frac{n}{2\pi} \tan^{-1} \left[\frac{m}{n \sqrt{m^2 + n^2 + 1}} \right]$$

También se puede calcular los factores de forma (Steinbrenner, 1934) y Factor de profundidad (Fox, 1948) con las figura o tablas que se muestran en los anexos E. y F.

Debido a la naturaleza no homogénea de los depósitos de suelo, la magnitud E_s puede variar con la profundidad por esta razón Bowles (1987) recomendó utilizar un promedio ponderado de E_s en la ecuación.

$$E_s = \frac{\sum E_{si} \Delta z}{\bar{z}}$$

Donde

E_{si} : Modulo de elasticidad del suelo dentro de una profundidad Δz

$\bar{z} = H$ o $5B$, el que sea menor

- **PARA SUELOS GRANULARES**

Los asentamiento en suelos granulares también se puede evaluar utilizando el método de Schemertman (1978) utilizando el factor de influencia que fue calibrado mediante el uso de datos empíricos.

Schmertman propuso utilizar una sumatoria de asentamientos de capas aproximadamente homogéneas, seleccionadas todas ellas de manera apropiada. Posteriormente el asentamiento inmediato es obtenido de la siguiente expresión,

$$S_e = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_z} \Delta z \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde

C_1 : Factor de corrección para la profundidad del empotramiento de la cimentación.

$$C_1 = 1 - 0.5 \left(\frac{q}{\bar{q} - q} \right)$$

C_2 : Factor de corrección para tomar en cuenta la fluencia plástica del suelo

$$C_2 = 1 + 0.2 \log(10t(\text{período en años}))$$

\bar{q} : Esfuerzo al nivel de la cimentación

q : Esfuerzo efectivo en la base de la cimentación

$$q = \gamma D f$$

E_s : Módulo de elasticidad del suelo

I_z : Factor de influencia de la deformación unitaria

El factor de influencia se determina en relación a la profundidad de acuerdo a las siguientes relaciones sugerida por Salgado (2008) para la interpolación de I_z en $z=0$, z_1/B y z_2/B para cimentaciones rectangulares.

- $z = 0$

$$I_z = 0.1 + 0.0111 \left(\frac{L}{B} - 1 \right) \leq 0.2$$

- $z = z_1$

$$I_{z(m)} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{\bar{q} - q}{q'_{z(1)}}}$$

$q'_{z(1)}$: Esfuerzo efectivo a una profundidad de z_1 antes de la construcción de la cimentación

- Variación de $\frac{z_1}{b}$ para $I_{z(m)}$

$$\frac{z_1}{B} = 0.5 + 0.055 \left(\frac{L}{B} - 1 \right) \leq 1$$

- Variación de $\frac{z_2}{b}$ para $I_{z(m)}$

$$\frac{z_2}{B} = 0.5 + 0.222 \left(\frac{L}{B} - 1 \right) \leq 4$$

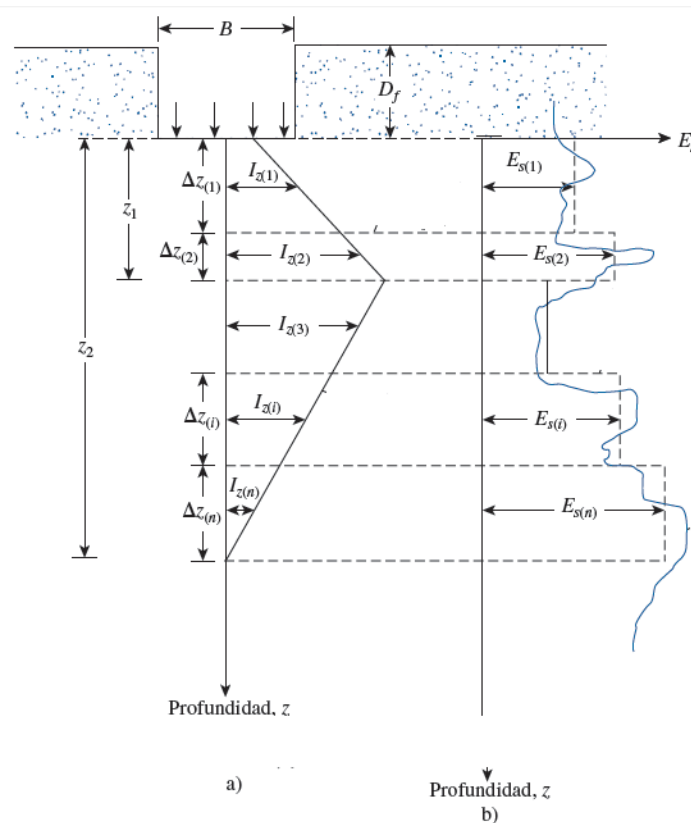


Figura 3.14. Variación del factor de influencia y Modulo de Young con la profundidad

Asentamientos elásticos de cimientos rígidos. “Scheleicher (1926), indica que el asentamiento en superficie de un cimiento rígido, uniformemente cargado es aproximadamente 7% menor que el asentamiento promedio en superficie de un cimiento flexible”.

$$S_{e\text{rígida}} = 0.93 S_{e\text{(flexible, centro)}} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

3.9. Procedimiento propuesto para el análisis de capacidad carga y Asentamientos Elásticos.

A continuación mediante un ejemplo se describe un procedimiento propuesto para la obtención de los parámetros geotécnicos tomando las velocidades de onda V_p y V_s obtenidos con los softwares WINSIM Y MASW.

Una cimentación rígida cuadrada $B = L = 1.2$ m ubicada en la Línea-3 (Colegio Manuel J. Calle) a un desplante de 2.5m. Para conocer la capacidad de carga admisible del suelo y los asentamientos elásticos se puede seguir de la siguiente manera:

Los resultados obtenidos de las velocidades de onda sísmica (V_p y V_s) de la línea 3 para el estrato correspondiente de 0 a 2.5 metros son:

$$V_p = 552 \text{ m/s}$$

$$V_s = 284 \text{ m/s}$$

A partir de estos se pueden obtener mediante las expresiones citadas anteriormente se determinan los siguientes parámetros:

- **Densidad:** $\gamma = 4.3 (284)^{0.25} = 17.65 \text{ KN/m}^3$

- **Coeficiente Poisson:** $\mu = \frac{3.77-2}{2(3.77-1)} = 0.32$

- **Módulo de Elasticidad dinámico:**

$$E_{din} = 2 \times (1 + 0.32) \times 145133 = 383152 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 3905.72 \text{ kg/cm}^2$$

El módulo de elasticidad estático: se puede calcular mediante las formulaciones propuestas en la tabla 3.2.

$$E_{est} = 0.09346 * E_{din} + 4 = 0.09346 * 3905.72 + 4 = 369.03 \text{ kg/cm}^2$$

- **Capacidad de carga admisible:**

Se calcula la capacidad de carga admisible para cimientos someros

Para $V_s = 284 < 750$ se toma la expresión de la tabla 3.3. para suelos

$$q_a = 0.025 \gamma V_s \beta \quad \text{Para este ejemplo se asume } \beta = 1 \text{ y se obtiene}$$

$$q_a = 0.025 \times 16.35 \times 209 = 125 \text{ KN/m}^2$$

De acuerdo a lo propuesto en la sección 3.7 se asume valores de c y ϕ acorde al sitio de estudio: En la zona se presenta un suelo arcilloso (suelos cohesivo) por lo que se deberían asumir valores de cohesión alto y coeficientes de fricción bajos, paralelamente estos deben presentar resultado aproximados a lo determinado mediante la expresión propuesta por Tezcan et al (2006).

γ	17.65	KN/m ³
D_f	0	m
B	1.2	m
F_s	3	

$c \setminus \phi$	4	5	6
54	112,53	118,38	124,64
55	114,59	120,55	126,91
56	116,66	122,71	129,18
57	118,72	124,87	131,46
58	120,78	127,04	133,73
59	122,84	129,20	136,00
60	124,90	131,36	138,27

Para este ejemplo se asumirá valores de $c = 54 \text{ KN/m}^2$ y se toma un $\phi = 0^\circ$ para mayor seguridad y se puede proceder a calcular la capacidad admisible mediante la ecuación general de la capacidad de carga de Meyerhof (1963) y aplicando un factor de seguridad de 3.

$$q_u = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + \gamma D_f N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 1/2 \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

$$q_{adm} = q_u/3$$

Con los datos $D_f = 2.5$, $B = L = 1.2$ y un $\gamma = 17.65$ se determina que la capacidad admisible es igual a:

$$q_{adm} = 174.3 \text{ KN/m}^2$$

- Asentamientos Elásticos:

Para una cimentación flexible cuadrada $B = L = 1.2 \text{ m}$ a una profundidad de $D_f = 2.5 \text{ m}$, con los parámetro geométricos determinados $E = 369 \text{ Kg/cm}^2$, $\mu = 0.32$ y asumiendo una presión neta sobre la cimentación de $q_o = 125 \text{ KN/m}^2$.

Mediante las figuras y tablas de los anexos E. y F. se obtiene los factores de forma y profundidad para el centro y en una esquina de la cimentación obteniéndose:

Esquinas		Centros	
$F1$	0,45	$F1$	0,49
$F2$	0,03	$F2$	0,02
Is	0,47	Is	0,50
If	0,57	If	0,57

Aplicando la ecuación 3.11 se obtiene los asentamientos para cimentaciones flexibles:

Esquinas		Centros	
Se	0.99 mm	Se	2.12 mm

Para una cimentación rígida el asentamiento está dado por:

$$Se_{rigida} = 0.93 * 3.29 = 1.97mm$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Parámetros geotécnicos obtenidos en la investigación para el diseño de edificaciones del centro histórico de cuenca

Los parámetros geotécnicos obtenidos en base a método convencionales que se muestran en el anexo B son las siguientes:

Zona de estudio	Código	$\phi(o)$	$c(kN/m^2)$	$\gamma(kN/m^2)$
Plaza San Francisco	Línea 2	16,34	19,7	15,98
Colegio Manuel J.Calle	Línea 3	0	57,76	17

Tabla 4.1. Parámetros geotécnicos obtenidos en base a métodos convencionales.

Con estos parámetros se puede determinar valores de la capacidad de carga admisible del suelo aplicando la expresión de (Terzagui, 1943), aplicando un factor de seguridad igual a 3, los resultado se muestran en la tabla 4.2.

Df\B	Línea 2: Plaza San Francisco				Línea 3: Colegio Manuel J.Calle			
	0,6	0,8	1	1,2	0,6	0,8	1	1,2
0	83,22	84,99	86,76	88,53	103,70	103,74	103,78	103,82
0,2	87,99	89,76	91,53	93,30	104,94	104,98	105,02	105,06
0,4	92,76	94,53	96,30	98,07	106,17	106,21	106,25	106,29
0,6	97,54	99,30	101,07	102,84	107,41	107,45	107,49	107,53
0,8	102,31	104,08	105,84	107,61	108,64	108,68	108,72	108,76
1	107,08	108,85	110,62	112,38	109,88	109,92	109,96	110,00
1,2	111,85	113,62	115,39	117,16	111,11	111,15	111,19	111,23
1,4	116,62	118,39	120,16	121,93	112,35	112,39	112,43	112,47
1,6	121,39	123,16	124,93	126,70	113,58	113,62	113,66	113,70
1,8	126,16	127,93	129,70	131,47	114,82	114,86	114,90	114,94
2	130,93	132,70	134,47	136,24	116,06	116,09	116,13	116,17

Tabla 4.2. Capacidad de carga admisible en KN/m2 obtenido mediante la ecuación de Terzagui. (1943).

4.2. Velocidades de ondas sísmicas V_s y V_p

Los resultados de las velocidades de compresión V_p mediante WINSISM se resumen en la tabla 4.3.

CODIGO	ESTRATO	Espesor (Δh)	Profundidad (z)	V_p
		m	m	m/s
LINEA 1	1	0,5	0,5	413
	2	2,5	3	457
	3	∞	∞	1230
LINEA 3	1	0,3	0,3	161
	2	1,9	2,2	552
	3	6,1	8,3	765
	4	∞	∞	1255

Tabla 4.3. Velocidades de compresión (V_p)

En la línea 1 se tiene poca información llegando a los tres metros de profundidad, esto es debido a la fuente activa con poca energía (martillo) además en esta línea había un tramo de superficie que impide obtener una mejor información, sin embargo esta información resulta útil para conocer obtener las V_p y por ende las condiciones de los primeros estratos. En la línea 2 no se puede determinar las V_p por las condiciones de la superficie (superficie rígida-concreto) y por el ruido ambiental que existía durante el ensayo. Mientras en la línea 3 se obtiene una mejor información llegando a los ocho metros, esto se debe a que el ensayo fue realizado en lugar con poco ruido ambiental y en una superficie suave.

Los resultados de las velocidades de corte V_s mediante el software Masw se resumen en la tabla 4.4.

CODIGO	# Estrato	Espesor (Δh)	Profundidad(z)	V_s
		m	m	m/s
LINEA 1	1	0,5	0,5	209
	2	2,5	3	224
	3	13	16	561
	4	5	21	589
	5	5	26	564
	6	6	32	530
	7	∞	∞	581
LINEA 2	1	5	5	222
	2	4	9	276
	3	6	15	401
	4	∞	∞	420
LINEA 3	1	6	6	284
	2	8	14	308
	3	24	38	333
	4	∞	∞	521

Tabla 4.4. Velocidades de corte (V_s)

En la línea 1 y 3 se obtiene información a más de 30 metros de profundidad, esto debido a los ensayos pasivos que permiten llegar a frecuencias más bajas sin necesidad de fuentes de gran energía. En la línea 2 se obtiene una información solo hasta los 15 metros esto podría deberse a la heterogeneidad que existe en este tipo de suelos (terrazza glacial, nivel 2).

4.3. Parámetros Geotécnicos obtenidos mediante la Geofísica

Los módulos elásticos dinámicos se obtiene en base a los datos de las V_p y V_s obtenidos de la prospección geofísica, Los resultados se muestra en la tabla 4.5.

CODIGO	ESTRATO	Espesor (Δh)	Profundidad (z)	V_p	V_s	γ	G	E_c	ν	E	K
		m	m	m/s	m/s	KN/m^3	KN/m^2	KN/m^2		KN/m^2	KN/m^2
LINEA 1	1	0,5	0,5	455	209	16,35	72800	345031,5	0,37	198931	247966
	2	2,5	3	466	224	16,64	85086	368241,9	0,35	229690	254794
	3	13	16	1199	561	20,93	671376	3066751,1	0,36	1825955	2171583
	4	5	21	1259	589	21,18	749133	3422785,8	0,36	2037499	2423942
	5	5	26	1206	564	20,96	679481	3106803,8	0,36	1848236	2200829
	6	6	32	1133	530	20,63	590772	2699779,1	0,36	1606831	1912083
	7	∞	∞	1242	581	21,11	726433	3319607,0	0,36	1975802	2351029
LINEA 2	1	5	5	415	222	16,60	83386	291396,2	0,300	216731	180215
	2	4	9	516	276	17,53	136096	475692,3	0,300	353746	294231
	3	6	15	750	401	19,24	315409	1103336,7	0,300	819968	682791
	4	∞	∞	786	420	19,47	350034	1225905,1	0,300	910214	759193
LINEA 3	1	2,5	2,5	552	284	17,65	145133	548286,0	0,32	383152	354776
	2	3,5	6	765	284	17,65	145133	1053057,1	0,42	412199	859547
	3	8	14	829	308	18,01	174196	1261961,7	0,42	494692	1029700
	4	24	38	897	333	18,37	207634	1506591,1	0,42	589713	1229745
	5	∞	∞	1403	521	20,54	568440	4122154,1	0,42	1614393	3364235

Tabla 4.5. Parámetros geotécnicos dinámicos obtenidos en las tres líneas de estudio

Los módulos elásticos estáticos se pueden obtener mediante las correlaciones para la módulo Young presentadas en tabla 3.2 y expresiones derivadas de la teoría de la elasticidad, los resultados obtenidos se muestra en la tabla 4.6.

CODIGO	ESTRATO	Espesor (Δh)	Profundidad (z)	E	E_c	G	k
		m	m	KN/m^2	KN/m^2	KN/m^2	KN/m^2
LINEA 1	1	0,5	0,5	194	335,6	71	241
	2	2,5	3	223	357,2	83	247
	3	13	16	1744	2928,4	641	2074
	4	5	21	1945	3267,6	715	2314
	5	5	26	1765	2966,6	649	2101
	6	6	32	1535	2578,8	564	1826
	7	∞	∞	1886	3169,3	694	2245
LINEA 2	1	5	5	210	282,9	81	175
	2	4	9	341	458,5	131	284
	3	6	15	785	1056,5	302	654
	4	∞	∞	871	1173,3	335	727
LINEA 3	1	2,5	2,5	369	528,1	140	342
	2	3,5	6	397	1013,5	140	827
	3	8	14	475	1212,5	167	989
	4	24	38	566	1445,6	199	1180
	5	∞	∞	1542	3937,4	543	3213

Tabla 4.6. Parámetros geotécnicos Estáticos mediante expresiones empíricas.

La capacidad admisible para cimientos someros mediante la expresión propuesta por Tezcan et. al. (2006) y valores aproximados de c y ϕ según lo propuesto en la sección 3.7 se presenta en la tabla 4.7.

CODIGO	ESTRATO	Espesor (Δh)	Profundidad (z)	V_p	V_s	γ	q_a	c	ϕ
		m	m	m/s	m/s	KN/m^3	KN/m^2	KN/m^2	o
LINEA 1	1	0,5	0,5	455	209	16,35	85	45	2
	2	2,5	3	466	224	16,64	93	49	2
	3	13	16	1199	561	20,93	294	4	37
	4	5	21	1259	589	21,18	312	4	37
	5	5	26	1206	564	20,96	295	4	37
	6	6	32	1133	530	20,63	273	4	37
	7	∞	∞	1242	581	21,11	307
LINEA 2	1	4	4	415	222	16,60	92	8	25
	2	4	8	516	276	17,53	121	12	25
	3	7	15	750	401	19,24	193	4	34
	4	∞	∞	786	420	19,47	204
LINEA 3	1	2,5	2,5	552	284	17,65	125	54	5
	2	3,5	6	765	284	17,65	125	54	5
	3	8	14	829	308	18,01	139	60	5
	4	24	38	897	333	18,37	153	65	5
	5	∞	∞	1403	521	20,54	268

Tabla 4.7. Capacidad de carga admisible según Tezcan et al (2006) y valores propuestos de c y ϕ .

4.4. Análisis y Comparación

En la línea 1, es una zona interesante de observar los resultados que se pueden dar, ya que según la carta geológica de cuenca la línea 1 estaría ubicada entre dos depósitos: arcillas varvadas y terraza glaciaria. Esto se puede apreciar con los resultados obtenidos mediante la prospección geofísica que muestra baja velocidades de corte V_s hasta los 3 metros de profundidad esto supondría que pertenece a un suelo blando como son las arcillas varvadas. Después de los 3 metros existe un cambio brusco de velocidad que supondría un suelo más compacto que se podría suponer son las terrazas glaciares, esto muestra la eficacia de los métodos geofísicos para distinguir tipos de suelos, además se obtiene información a profundidades mucho mayores que con métodos convencionales y sin necesidad de costosas excavaciones.

En la línea 2 perteneciente a terraza glaciaria nivel 2, analizando los resultados de la prospección geofísica se puede observar que existe un suelo suave hasta una profundidad de 9 metros, después de estos se presenta un cambio por un material más duro, esto corresponde con la investigación de campo realizada por Ing. Ordoñez que se describe en la sección 3.3.2.1, con una cierta diferencia en las profundidades, esto puede deberse a los diferentes puntos de ejecución el ensayo por la necesidad de un mayor espacio para los ensayos geofísicos.

En la línea 3 que pertenece a arcillas varvadas, se observa un material con características homogéneas en relación a su profundidad con ciertos incrementos en su consistencia.

La capacidad admisible de carga para la línea 2 y 3 mediante la ecuación de Terzagui (1943), para desplantes poco profundos que se muestra en la tabla 4.1, paralelamente se tiene los resultados mediante la ecuación empírica propuesta por Tezcan et. al, en la tabla 4.7 y se observa que estos son aproximados y confiables para cimentaciones pocas profundas .

Cada uno de los reportes generados de cada línea, se adjuntan en el anexo H.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos utilizando prospección geofísica comparando con los que se pueden obtener al realizar ensayos geotécnicos tradicionales como el SPT, no presentan diferencias significativas, sin embargo, debería tomarse en cuenta las características geológicas del suelo en estudio, para establecer los parámetros suficientes, que permitirán tener una mejor exactitud de los resultados.
- La ubicación en la cual se realiza una caracterización geofísica de un suelo, es muy importante, y mucho más aún, si en el terreno en el cuál se efectúa, corresponde a una estructura geológica compuesta principalmente por clastos heterogéneos (Terraza Glacial), los resultados que pueden obtenerse, pueden variar con mucho, de un lugar a otro, aunque se trate de la misma geología local.
- Cuando el estudio geofísico de un suelo se realiza sobre elementos rígidos, como pavimentos rígidos, o adoquines, las profundidades de los estratos que se pueden alcanzar son pequeños, sin embargo, esto no quita, que los resultados sean exactos, aunque se realicen a profundidades bajas.
- Los métodos de prospección geofísica resultan muy exactos a la hora de establecer profundidades de los estratos, mientras que, el método SPT, permite determinar (como un método invasivo) las características de cierto estrato, a cierta profundidad, o a la profundidad a la cual se realice la perforación. De ahí que, la geofísica determina las características geotécnicas generales de un terreno, a diferencia del método SPT, que solo nos permite determinar las características del terreno, pero en cierto punto en particular, esto no resultado del todo exacto, cuando se analizan suelos de material heterogéneo, como el que se encuentra en el centro histórico de Cuenca.
- Por efectos prácticos, realizar estudios de prospección geofísica o sísmica de refracción, resulta mucho más eficaz, puesto que son métodos no invasivos, y por lo tanto, menos costosos.

- A mayores valores de V_p , en cada una de las líneas levantadas en campo, correspondiente a cada una de las profundidades analizadas, se puede concluir que la capacidad admisible es mayor, dando una clara idea de la resistividad que tiene un suelo, dependiendo del material que lo compone.
- Considerando la distribución de estratos, al igual que el valor de la capacidad portante que se ha obtenido en la línea 3 (Colegio Manuel J. Calle), puede concluirse que la consistencia del suelo varía de blanda a más dura, dejando en la parte menos profunda del suelo, una serie de limos inorgánicos con compresibilidad alta, que pertenece a un depósito de arcillas varvadas. En la parte más profunda del suelo se puede encontrar una consistencia más dura, y con menor compresibilidad.
- Se ha podido reconocer, investigar, y analizar los suelos que se encuentran en el centro histórico de la ciudad, y como los métodos de prospección geofísica pueden ayudar a realizar una caracterización de un suelo de forma más rápida y menos costosa, aún si se trata de un suelo heterogéneo o arcilloso, sin embargo, el crecimiento urbano de la ciudad no está concentrado en este sector, sino en sus alrededores. Nuestra recomendación, para futuros estudios que se realicen, es hacer el mismo análisis, pero en zonas de expansión urbana, como son; Racar, Challuabamba, el Valle, etc. De esta manera, se podrá determinar las características geotécnicas de estos suelos, en donde obras civiles de tamaño considerable se están construyendo, por lo que la necesidad de estudiar y analizar los suelos de estos sectores, también será imprescindible.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguay, H. N., & Dranichnikov, T. (2015). *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Braja M. Das. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.
- Chammas, R., Abraham, O., Cote, P., Pedersen, H. A., & Semblat, J. F. (2003). Characterization of Heterogeneous Soils Using Surface Waves: Homogenization and Numerical Modeling. *International Journal of Geomechanics*, 3(1), 55–63.
- Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M. (2009). La Biblia de la Geofísica. *Universidad Nacional de La Patagonia San Juan Bosco*.
- Cintas, S. R. (2013). *Estudio y Optimización de Técnicas basadas en ruido ambiente para la caracterización del terreno: Aplicación del SE de la Península Ibérica*. Universidad de Alicante.
- Correia, N. (2015). Obtención del Perfil de Velocidad de Onda de Corte Mediante Método MASW y Comparación con Ensayo Tipo DownHole en Estaciones Sismológicas de Zona Central. *Universidad De Chile*.
- Devincenzi, M., & Frank, N. (2004). Ensayos Geotécnicos In Situ. *IGEOTEST*.
- Gayá, M. (2004). Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo de Ainsa (Huesca). *Universidad Politécnica de Catalunya*.
- Gonzales, J. A. A. (2011). Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica.
- Guarachi, F. A. H. (2013). Aplicación De Métodos Geofísicos Basados En Ondas Superficiales Para La Caracterización Sísmica De Suelos. Aplicación a La Microzonificación Sísmica Del Norte Y Poniente De Santiago. *Pontificia Universidad Católica De Chile*.
- Jose Tomas Errazuriz. (2012). MICROZONIFICACIONES SÍSMICAS EN CIUDADES DEL MUNDO Y DISCUSIÓN SOBRE LA APLICABILIDAD EN LA CIUDAD DE SANTIAGO. *Universidad De Chile*.
- Kaptan, K. (2012). A refined formula for the allowable soil pressure using shear wave velocities. *Aydin University*.
- Lazcano, S. (2007). Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie.
- López, J. M., Mejía, J. A., & Vega, N. (2008). Aplicación del Método de Refracción Sísmica Para la Determinación de Velocidades de Ondas P. *Universidad De El Salvador*.
- Mercedes, G., & Montenegro, L. (2005). Introducción y Aplicación del método



de sísmica de microtemores en áreas urbanas. *Universidad Simón Bolívar Ingeniería Geofísica*.

Muelas Rodríguez, A. (2010). *Manual de mecánica del suelo y cimentaciones*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Retrieved from

Ochoa, F. (2007). Caracterización Geotécnica A Traves del Uso de Ondas Rayleigh. *Universida de Chile*.

Rodas, R., & Torres, M. (2012). *Estudio de las Envolventes Consolidada-Drenada Mediante Ensayo de Corte Directo para el Analisis de Estabilidad de las Presas de Tierra del Proyecto Pacalori*. Universidad de Cuenca.

Villamizar, J. D. J. (2011). Métodos Geofísicos Aplicados a la Caracterización de Suelos. *Universidad Industrial de Santander*.



ANEXOS



A. Planos de ubicación de líneas donde se realizaron las pruebas geofísicas

B. Plan de ensayos de laboratorio y resultados obtenidos (Ing. Franklin Ordoñez)

Línea 2 (Plaza San Francisco)

ENSAYOS DE LABORATORIO:

Con los sondeos realizados, se ha determinado la consistencia de los depósitos cohesivos mediante ensayos SPT, también se procedió a la toma de muestras mediante la utilización de muestreadores de tubo partido.

Con las muestras así obtenidas, se realizó un plan de ensayos de laboratorio, normados por la ASTM, siendo los utilizados los siguientes:

- Contenido de agua ASTM D-2216
- Granulometría ASTM D-422
- Límite líquido ASTM D-423
- Límite plástico ASTM D-424
- SPT
- Ensayo triaxial consolidado drenado

SONDEO N°1

ING. FRANKLIN ORDOÑEZ M. CICA 632		PROYECTO : CIMENTACION PLAZA SAN FRANCISCO UBICACION : PADRE AGUIRRE Y PRESIDENTE CORDOVA PERFORACION No. : 2 PESO DEL MATILLO : 44 KG ALTURA DE CAIDA : 76 CM	
--------------------------------------	--	--	--

COTAS	PROFUNDIDAD (m)	ESTRATIGRAFIA		CLASIFICACION SUCS	# DE GOLPES SPT DE CAMPO	FACTOR CORRECCION	N ₆₀	N ₆₀ CORREGIDO	C _u ton/m ²	MUESTRAS DISTURBADAS						OBSERVACIONES
		SIMBOLOGIA GRAFICA	DESCRIPCION DEL MATERIAL							GRANULOMETRIA (% QUE PASA)			LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	H. NATURAL %	
										No.4	No.40	No.200				

	0.00	Limos inorgánicos de alta compresibilidad consistencia media	MH														
	-1.00			6	0.3370	2	5	1.22									
	-1.50		8	0.4023	3	6	1.83	100	95	82.60	83.7	56.4	24.8				
	-2.00		Limos inorgánicos de alta compresibilidad consistente	MH	13	0.4655	6	10	3.67								
	-2.50				24	0.5037	12	19	7.34	100	97.6	81.20	70.1	36.2	24.2		
	-3.00		Limos inorgánicos de alta compresibilidad muy consistente	MH	29	0.5412	16	23	9.78								
	-3.50				32	0.5441	17	22	10.40	100	95.6	74	62.5	36.2	26.6		
	-4.00		Limos inorgánicos de alta compresibilidad muy consistente	MH	37	0.5441	20	24	12.23								
	-4.50				47	0.5441	26	30	15.90	100	96.4	74.6	65.1	35.8	28.2		
	-5.00		Limos inorgánicos de alta compresibilidad consistencia dura	MH	56	0.5412	30	33	18.34								
	-5.50	65			0.5441	35	36	21.40	100	94.4	78.2	77.1	36.6	24.7			
	-6.00	Limos inorgánicos de alta compresibilidad consistencia dura	MH	44	0.5441	24	24	14.68									
	-6.50			66	0.5441	36	35	22.01	100	94.2	71	67.2	40	23.9			

SONDEO N°2

ING. FRANKLIN ORDOÑEZ M. CICA 652		PROYECTO : CIMENTACION PLAZA SAN FRANCISCO UBICACION : PADRE AGUIRRE Y PRESIDENTE CORDOVA PERFORACION No. : 1 PESO DEL MATILLO : 44 KG ALTURA DE CAIDA : 76 CM	
--------------------------------------	--	--	--

COTAS	PROFUNDIDAD (m)	ESTRATIGRAFIA		CLASIFICACION SUCS	# DE GOLPES SPT DE CAMPO	FACTOR CORRECCION	N ₆₀	N ₆₀ CORREGIDO	C _u ton/m ²	MUESTRAS DISTURBADAS						OBSERVACIONES
		SIMBOLOGIA GRAFICA	DESCRIPCION DEL MATERIAL							GRANULOMETRIA (% QUE PASA)			LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	H. NATURAL %	
										No.4	No.40	No.200				
	0.00		Limos inorgánicos de alta compresibilidad consistencia media	MH	13	0.3370	4	10	2.45							
	-1.00				15	0.4023	6	12	3.67	100	95	73.60	82.7	47.5	26.4	
	-1.50		Limos inorgánicos de alta compresibilidad consistente	MH	23	0.4655	11	19	6.73							
	-2.00				38	0.5037	19	29	11.62	100	97	83.00	74.6	35.7	25.5	
	-2.50		Limos inorgánicos de alta compresibilidad muy consistente	MH	37	0.5412	20	28	12.23							
	-3.00				32	0.5441	17	22	10.40	100	97.6	79.8	70.9	37.7	22.5	
	-3.50		Limos inorgánicos de alta compresibilidad muy consistente	MH	51	0.5441	28	34	17.12							
	-4.00				53	0.5441	29	33	17.73							
	-4.50		Limos inorgánicos de alta compresibilidad consistencia dura	MH	59	0.5412	32	35	19.57							
	-5.00				65	0.5441	35	36	21.40	100	95.8	77.6	72	39.2	26.3	
	-5.50															
	-6.00		Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad consistencia dura	CH	82	0.5441	45	45	27.52							
	-6.50				96	0.5441	52	50	31.80	100	94.2	71	54	27	19.5	

RESUMEN DE RESULTADOS

RESUMEN DE RESULTADOS

SONDEO #	PROF.(m)	TAMIZ #			% LL	% LP	% HN.	% IP	% IL.	Cu Ton/m ²	SUCS
		No. 4	No. 40	No. 200							
1	-1.50	95	73.60	82.68	47.49	26.42	29.33	21.07	0.14	3.67	MH
	-2.50	97	83.00	74.56	35.71	25.54	28.43	10.17	0.28	11.62	MH
	-3.50	100	97.6	79.8	70.87	37.7	22.48	33.17	-0.46	10.40	MH
	-4.50									17.73	MH
	-5.50	100	95.8	77.6	72.01	39.24	26.32	32.77	-0.39	21.40	MH
	-6.50	100	94.2	71	53.96	26.95	19.52	27.01	-0.28	31.80	MH
TERRAZA FLUVIOGLACIAL											
2	-1.50	100	95	82.60	83.69	56.39	24.8	27.30	-1.16	1.83	MH
	-2.50	100	97.6	81.20	70.14	36.22	24.15	33.92	-0.36	7.34	MH
	-3.50	100	95.6	74	62.46	36.23	26.56	26.23	-0.37	10.40	MH
	-4.50	100	96.4	74.6	65.07	35.83	28.17	29.24	-0.26	15.90	MH
	-5.50	100	94.4	78.2	77.14	36.55	24.69	40.59	-0.29	21.40	MH
	-6.50	100	94.2	71	67.23	39.95	23.9	27.28	-0.59	22.01	MH
TERRAZA FLUVIOGLACIAL											

LL Límite Líquido
LP Límite Plástico
IP Índice de plasticidad

IL Índice de liquidez
HN Humedad Natural
Cu Cohesión

SELECCIÓN DE PARAMETROS PARA CALCULOS GEOTECNICOS:

DEPOSITO	ϕ (°)	(Kn/m ²)	húmedo (Kn/m ³)	(Kg/cm ²)
Residual	16.34	19.70	15.98	57.00
Aluvial	47.00	00.00	19.50	200.00

Línea 3 (Manuel J. Calle)

ENSAYOS DE LABORATORIO:

Con los sondeos realizados, se ha determinado la consistencia de los depósitos limos arcillosos mediante ensayos SPT, y resistencia al corte no drenada in situ, mediante el uso de la veleta, también se procedió a la toma de muestras mediante la utilización de muestreadores de tubo partido.

Con las muestras así obtenidas, se realizó un plan de ensayos de laboratorio, normados por la ASTM, siendo los utilizados los siguientes:

- Contenido de agua ASTM D-2216
- Granulometría ASTM D-422
- Límite líquido ASTM D-423
- Límite plástico ASTM D-424
- SPT
- Corte con veleta ASTM D-2573

SELECCIÓN DE PARAMETROS PARA CALCULOS GEOTECNICOS:

DEPOSITO	ϕ (°)	C (Kn/m ²)	γ húmedo (Kn/m ³)	E (Kg/cm ²)
A 2.50m de prof.	0.00	57.76	17.00	75.00

C. Factores de Capacidad de carga

ϕ	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$	ϕ	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$
0	5.14	1.00	0.00	0.20	0.00	26	22.25	11.85	12.54	0.53	0.49
1	5.38	1.09	0.07	0.20	0.02	27	23.94	13.20	14.47	0.55	0.51
2	5.63	1.20	0.15	0.21	0.03	28	25.80	14.72	16.72	0.57	0.53
3	5.90	1.31	0.24	0.22	0.05	29	27.86	16.44	19.34	0.59	0.55
4	6.19	1.43	0.34	0.23	0.07	30	30.14	18.40	22.40	0.61	0.58
5	6.49	1.57	0.45	0.24	0.09	31	32.67	20.63	25.99	0.63	0.60
6	6.81	1.72	0.57	0.25	0.11	32	35.49	23.18	30.22	0.65	0.62
7	7.16	1.88	0.71	0.26	0.12	33	38.64	26.09	35.19	0.68	0.65
8	7.53	2.06	0.86	0.27	0.14	34	42.16	29.44	41.06	0.70	0.67
9	7.92	2.25	1.03	0.28	0.16	35	46.12	33.30	48.03	0.72	0.70
10	8.35	2.47	1.22	0.30	0.18	36	50.59	37.75	56.31	0.75	0.73
11	8.80	2.71	1.44	0.31	0.19	37	55.63	42.92	66.19	0.77	0.75
12	9.28	2.97	1.69	0.32	0.21	38	61.35	48.93	78.03	0.80	0.78
13	9.81	3.26	1.97	0.33	0.23	39	67.87	55.96	92.25	0.82	0.81
14	10.37	3.59	2.29	0.35	0.25	40	75.31	64.20	109.41	0.85	0.84
15	10.98	3.94	2.65	0.36	0.27	41	83.86	73.90	130.22	0.88	0.87
16	11.63	4.34	3.06	0.37	0.29	42	93.71	85.38	155.55	0.91	0.90
17	12.34	4.77	3.53	0.39	0.31	43	105.11	99.02	186.54	0.94	0.93
18	13.10	5.26	4.07	0.40	0.32	44	118.37	115.31	224.64	0.97	0.97
19	13.93	5.80	4.68	0.42	0.34	45	133.88	134.88	271.76	1.01	1.00
20	14.83	6.40	5.39	0.43	0.36	46	152.10	158.51	330.35	1.04	1.04
21	15.82	7.07	6.20	0.45	0.38	47	173.64	187.21	403.67	1.08	1.07
22	16.88	7.82	7.13	0.46	0.40	48	199.26	222.31	496.01	1.12	1.11
23	18.05	8.66	8.20	0.48	0.42	49	229.93	265.51	613.16	1.15	1.15
24	19.32	9.60	9.44	0.50	0.45	50	266.89	319.07	762.89	1.20	1.19
25	20.72	10.66	10.88	0.51	0.47						

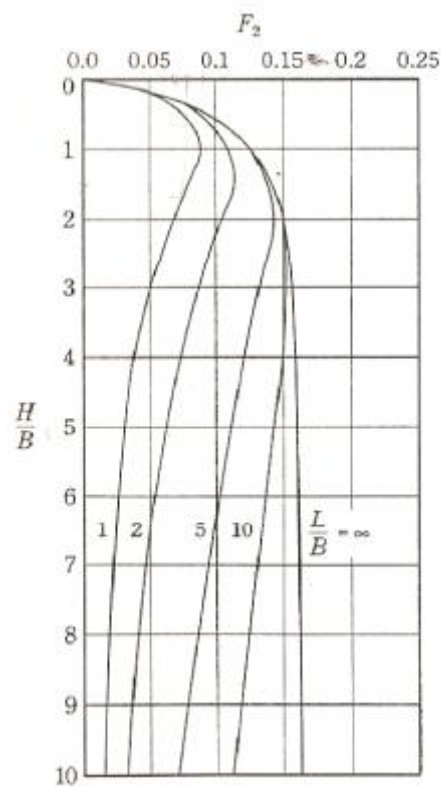
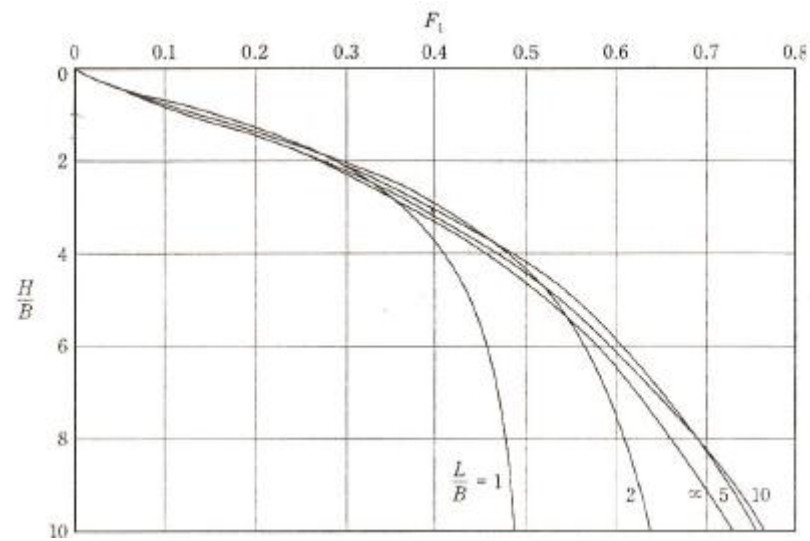
* Según Vesic (1973)

Capture

D. Factores de Forma, Profundidad e Inclinación recomendadas para usarse en el cálculo de la capacidad de carga admisible

Factor	Relación	Referencia
Forma	$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right)\left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	DeBeer (1970)
	$F_{qs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \phi'$	
	$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L}\right)$	
Profundidad	si; $\frac{D_f}{B} \leq 1$	Hansen (1970)
	Para $\phi = 0$:	
	$F_{cd} = 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B}\right)$	
	$F_{qd} = 1$	
	$F_{\gamma d} = 1$	
	Para $\phi' > 0$:	
	$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'}$	
	$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \left(\frac{D_f}{B}\right)$	
	$F_{\gamma d} = 1$	
	si; $\frac{D_f}{B} > 1$	
	Para $\phi = 0$:	
	$F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{\tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)}{\text{radianes}}$	
	$F_{qd} = 1$	
	$F_{\gamma d} = 1$	
	Para $\phi' > 0$:	
	$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'}$	
	$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \frac{\tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)}{\text{radianes}}$	
	$F_{\gamma d} = 1$	
Inclinación	$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2$	Meyerhof (1963); Hanna y Meyerhof (1981)
	$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi'}\right)$	
	$\beta = \text{inclinación de la carga sobre la cimentación respecto a la vertical}$	

E. Factores de Forma (Steinbrenner, 1934) para el cálculo de asentamientos elásticos.



F. Factores de profundidad (Fox, 1948) para el cálculo de asentamiento elásticos

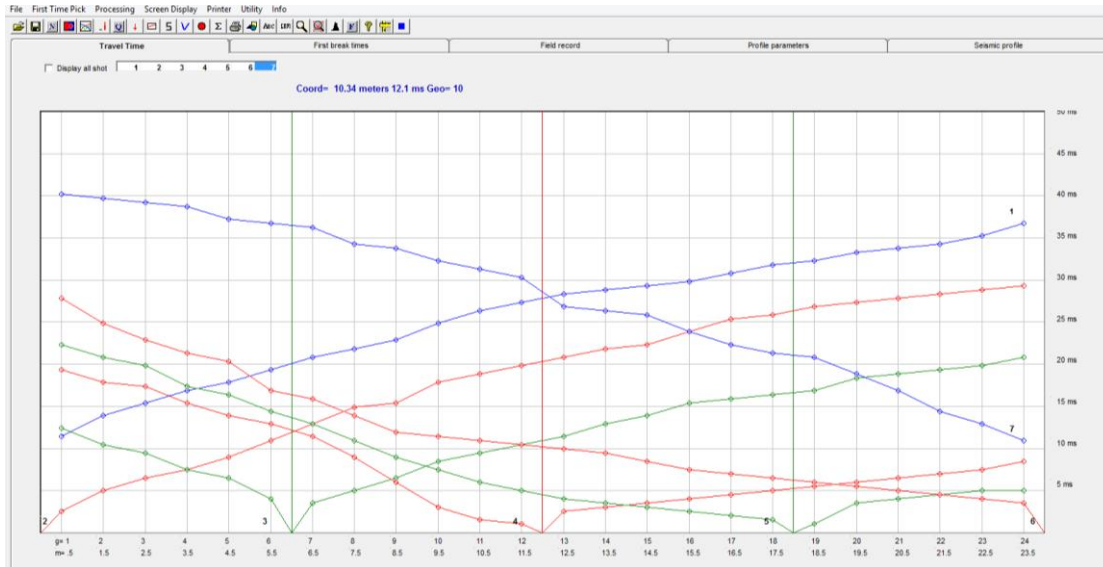
FACTOR DE PROFUNDIDAD DE FOX							
Df/B	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	5,0
Relación de Poisson $\nu_s = 0$							
0,05	0,950	0,954	0,957	0,959	0,961	0,963	0,973
0,10	0,904	0,911	0,917	0,922	0,925	0,928	0,948
0,20	0,825	0,838	0,847	0,855	0,862	0,867	0,903
0,40	0,710	0,727	0,740	0,752	0,761	0,769	0,827
0,60	0,635	0,652	0,666	0,678	0,689	0,698	0,769
0,80	0,585	0,600	0,614	0,626	0,637	0,646	0,723
1,00	0,549	0,563	0,576	0,587	0,598	0,607	0,686
2,00	0,468	0,476	0,484	0,492	0,499	0,506	0,577
Relación de Poisson $\nu_s = 0,10$							
0,05	0,958	0,962	0,965	0,967	0,968	0,970	0,978
0,10	0,919	0,926	0,930	0,934	0,938	0,940	0,957
0,20	0,848	0,859	0,868	0,875	0,881	0,886	0,917
0,40	0,739	0,755	0,768	0,779	0,788	0,795	0,848
0,60	0,665	0,682	0,696	0,708	0,718	0,727	0,793
0,80	0,615	0,630	0,644	0,656	0,667	0,676	0,749
1,00	0,579	0,593	0,606	0,618	0,628	0,637	0,714
2,00	0,496	0,505	0,513	0,521	0,528	0,535	0,606
Relación de Poisson $\nu_s = 0,30$							
0,05	0,979	0,981	0,982	0,983	0,984	0,985	0,990
0,10	0,954	0,958	0,962	0,964	0,966	0,968	0,977
0,20	0,902	0,911	0,917	0,923	0,927	0,930	0,951
0,40	0,808	0,823	0,834	0,843	0,851	0,857	0,899
0,60	0,738	0,754	0,767	0,778	0,788	0,796	0,852
0,80	0,687	0,703	0,716	0,728	0,738	0,747	0,813
1,00	0,650	0,665	0,678	0,689	0,700	0,709	0,780
2,00	0,562	0,571	0,580	0,588	0,596	0,603	0,675

FACTOR DE PROFUNDIDAD DE FOX							
Df/B	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	5,0
Relación de Poisson $\nu_s = 0,40$							
0,05	0,989	0,990	0,991	0,992	0,992	0,993	0,995
0,10	0,973	0,976	0,978	0,980	0,981	0,982	0,988
0,20	0,932	0,940	0,945	0,949	0,952	0,955	0,970
0,40	0,848	0,862	0,872	0,881	0,887	0,893	0,927
0,60	0,779	0,795	0,808	0,819	0,828	0,836	0,886
0,80	0,727	0,743	0,757	0,769	0,779	0,788	0,849
1,00	0,689	0,704	0,718	0,730	0,740	0,749	0,818
2,00	0,596	0,606	0,615	0,624	0,632	0,640	0,714
Relación de Poisson $\nu_s = 0,50$							
0,05	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999
0,10	0,988	0,990	0,991	0,992	0,993	0,993	0,996
0,20	0,960	0,966	0,969	0,972	0,974	0,976	0,985
0,40	0,886	0,899	0,908	0,916	0,922	0,926	0,953
0,60	0,818	0,834	0,847	0,857	0,866	0,873	0,917
0,80	0,764	0,781	0,795	0,807	0,817	0,826	0,883
1,00	0,723	0,740	0,754	0,766	0,777	0,786	0,852
2,00	0,622	0,633	0,643	0,653	0,662	0,670	0,747

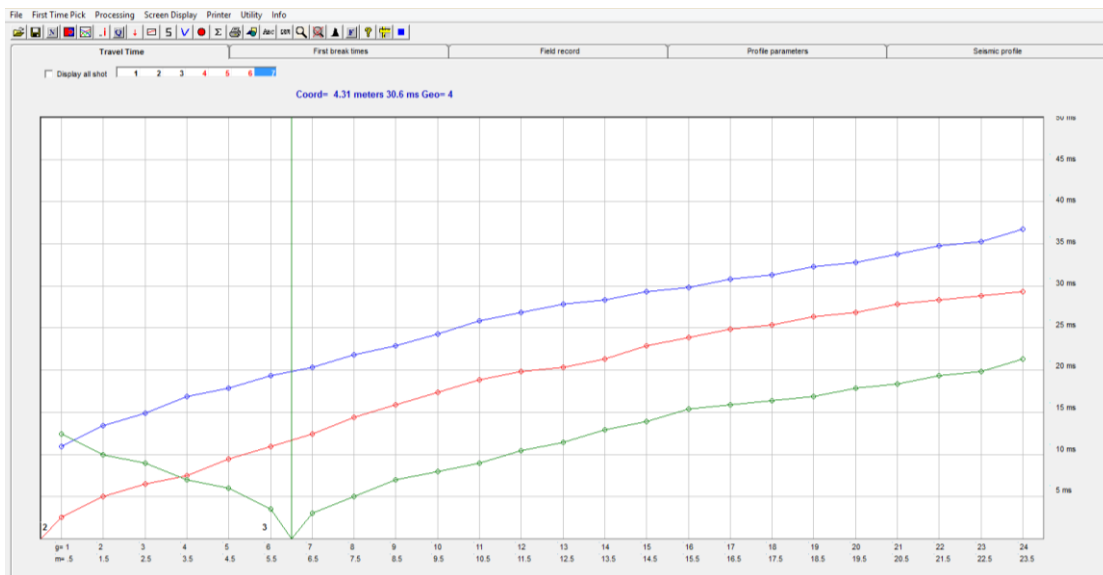
Para $D_f=0$, $I_f = 1$

G. Domocrónicas de cada línea de estudio con el método de Refracción Sísmica.

Borrero y Pío Bravo

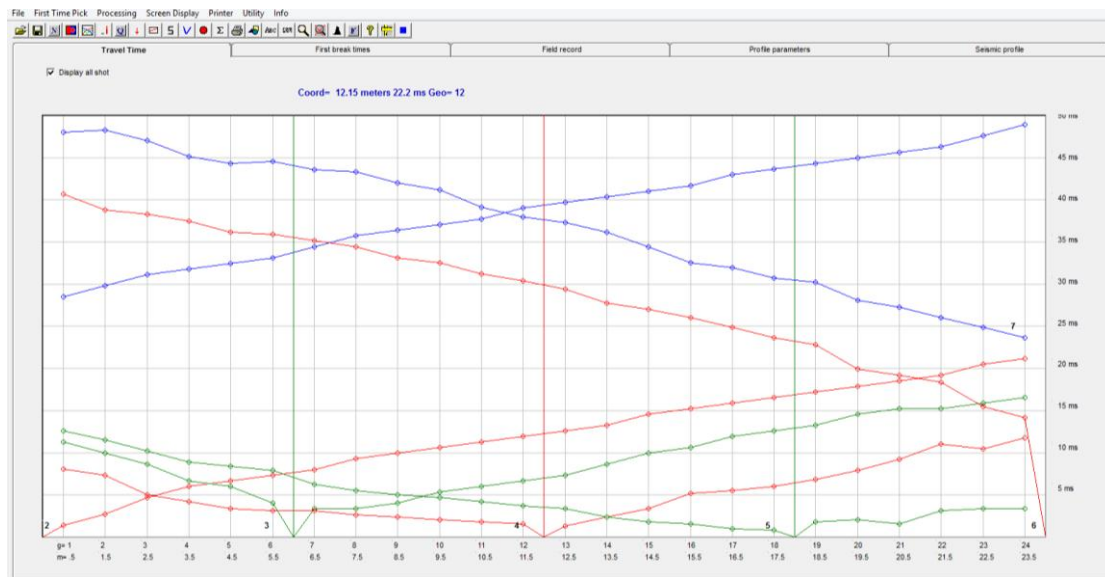


Se rechaza la información de los realizados shots en la superficie rígida.



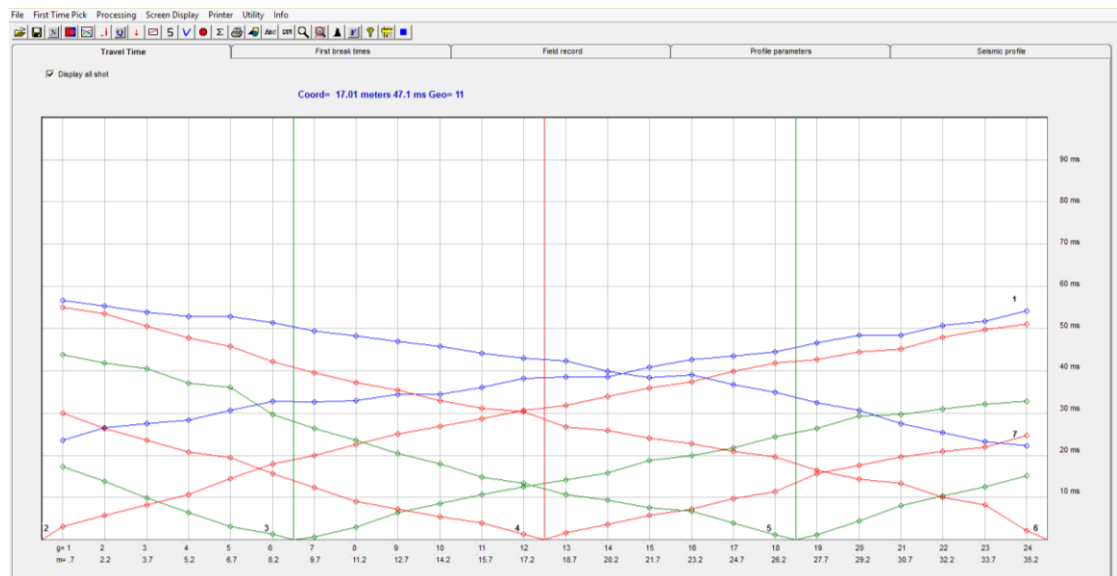
Información procesada de los 3 primeros shots en la superficie blanda.

Plaza San Francisco



Información rechazada debido a la superficie rígida existente en el ensayo

Colegio Manuel J. Calle





***H. Reportes MASW de cada línea de estudio con los
métodos MASW, ReMi, ESAC***

Borrero y Pío Bravo

MASW Analysis Report

Author:
BARZALLO

JUAN FERNANDO AVILÉS, BRYAN

Site:

Borrero y Pío Bravo

Date:

13/11/2015

Generated by MASW

(c) Vitantonio Roma. All rights reserved.



1 - Experimental data

Traces file name C:\GEOF_asus\TESIS_AVILES\LM2\MASW\SKLM3526_2.dat
Number of sensors..... 18
Sensors distance: 0m
Number of time samples 16464
Acquisition timestep 0.125ms
Number of sensors used for the analysis..... 18
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 2057.88ms
Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

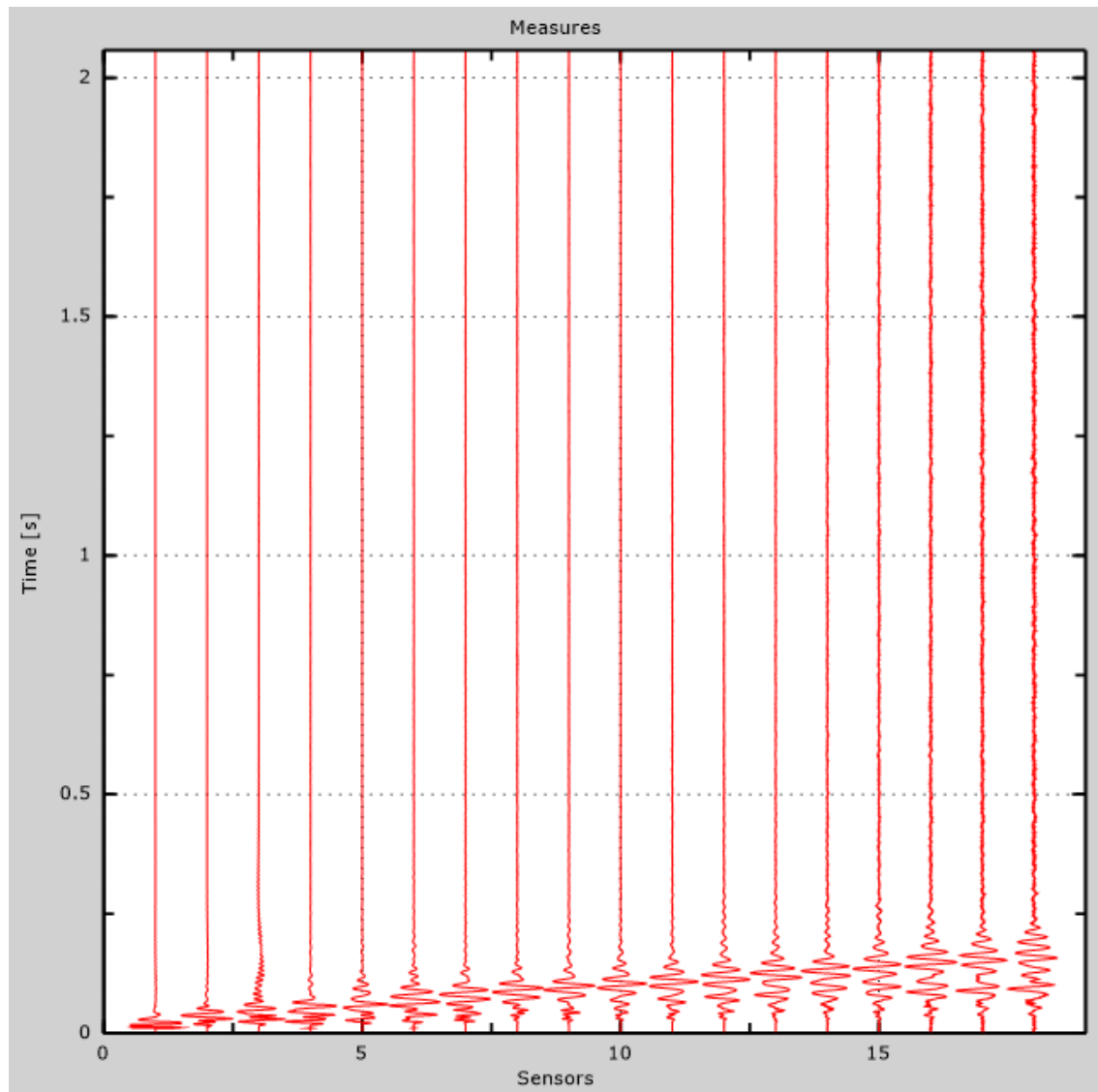


Figure 1: Experimental traces

2 - Analysis results

Final frequency..... 70Hz

Initial frequency 2Hz

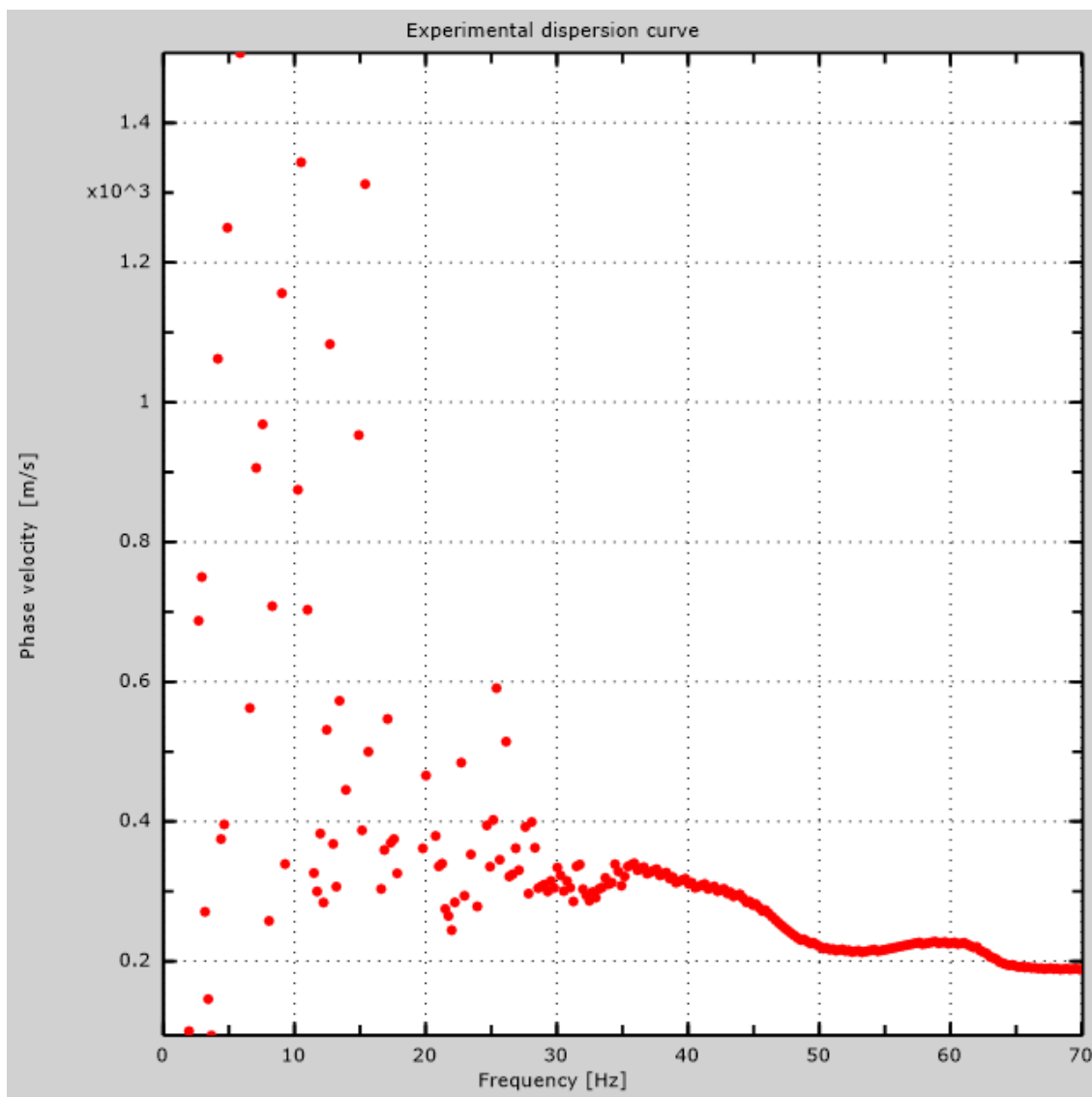


Figure 2: Experimental dispersion curve

3 - Analysis results (P)

Traces file name C:\GEOF_asus\TESIS_AVILES\LM2\REMI\SKLM4709.dat
 Number of sensors..... 24
 Number of time samples 3.26787e-312
 Acquisition timestep 2ms
 Number of sensors used for the analysis..... 24
 The interval considered for the analysis starts at 0ms
 The interval considered for the analysis ends at 65534ms
 Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

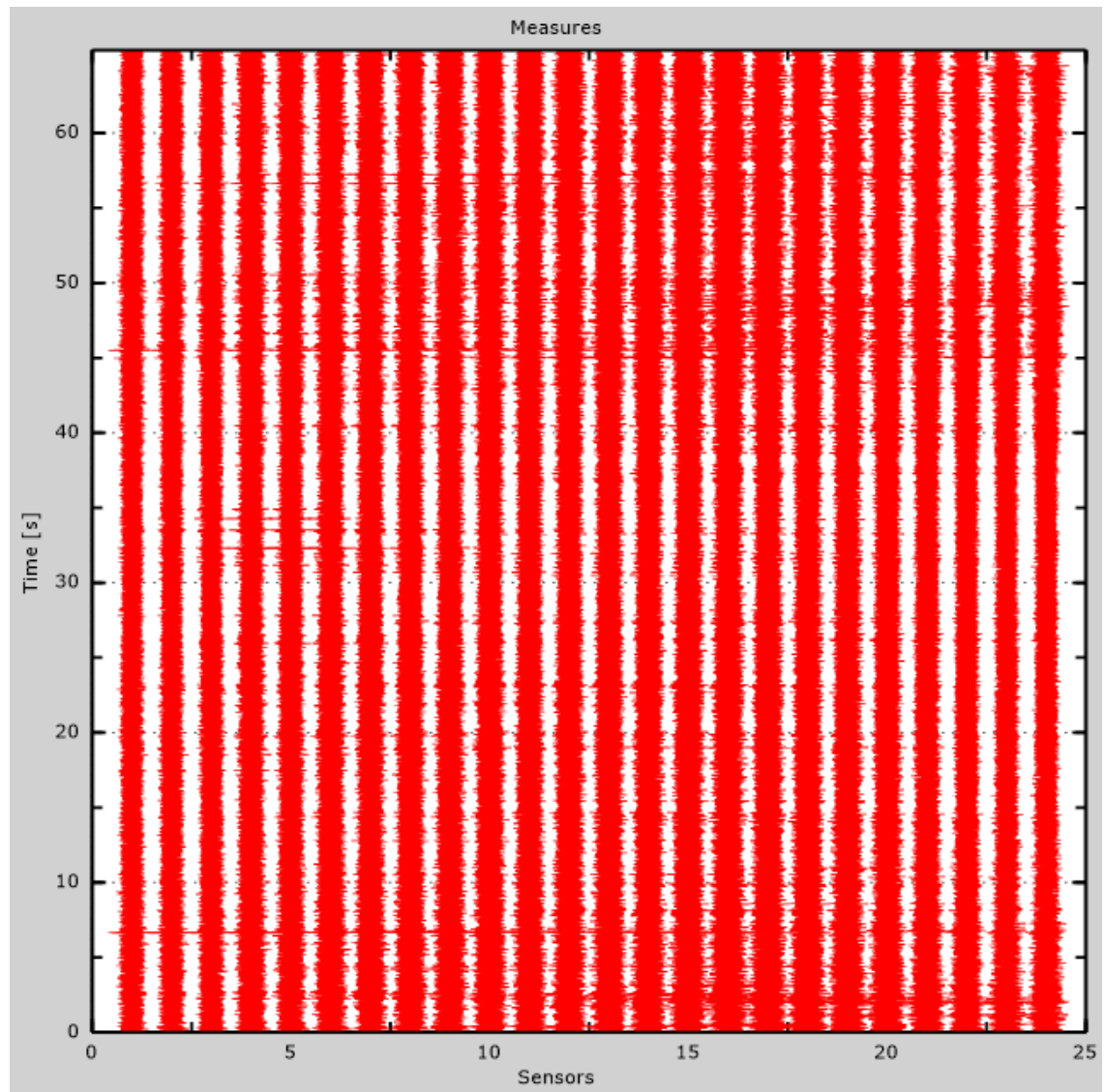


Figure 3: Experimental traces



4 - ESAC analysis

Traces file name C:\GEOF_asus\TESIS_AVILES\LM2\ESAC\SKLN3449.dat
Number of sensors..... 12
Number of time samples 425984
Acquisition timestep 2ms
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 851966ms
Window duration..... 10s
Overlap..... 0s
Smoothing 0.1
Cleaning threshold..... 0sd
Number of iterations 2

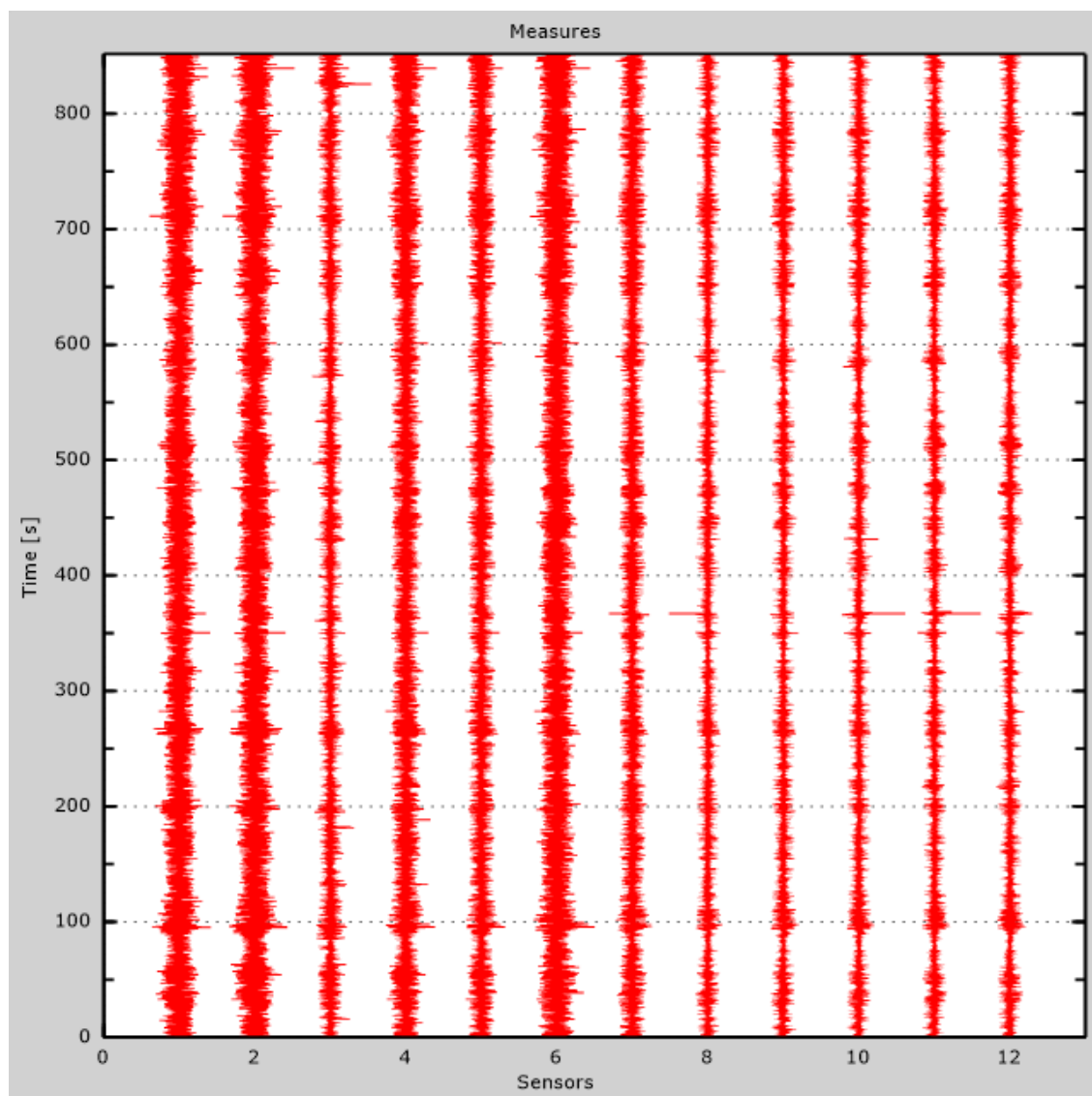


Figure 4: Experimental traces



Table 1: Geophones positions

X [m]	Y [m]
0	0
0	-2
0	-4
0	-6
0	-8
0	-10
-2	-10
-4	-10
-6	-10
-8	-10
-10	-10

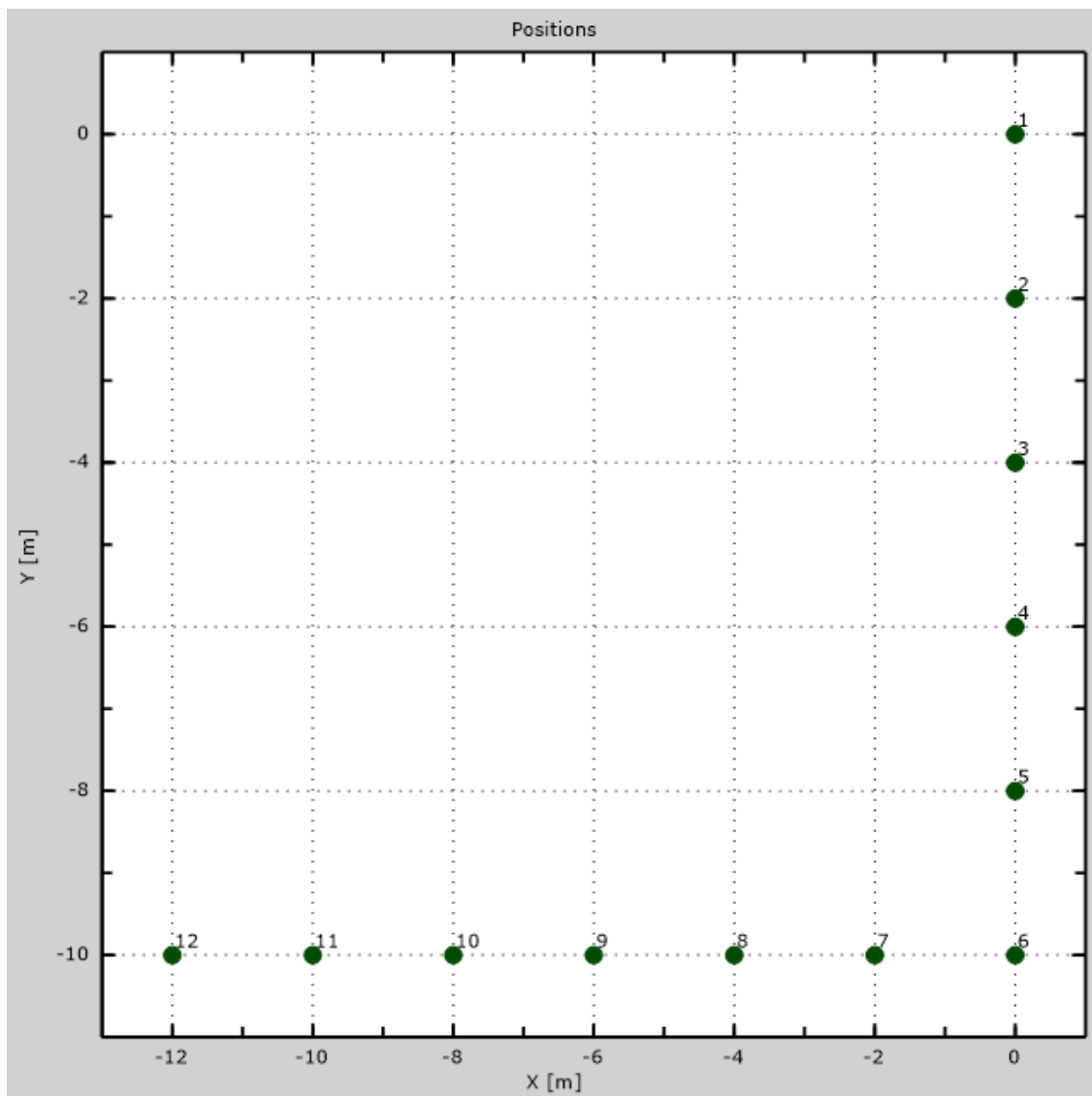


Figure 5: Geophones positions

5 - Dispersion curve

Table 2: Dispersion curve

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
3.67326	523.069	507.677	538.461
3.92238	531.864	517.206	546.523
4.28774	512.808	498.149	527.467
4.78597	522.336	510.609	534.063
5.3008	528.933	517.206	540.659
5.69938	526.001	517.206	534.796
5.99831	502.547	490.82	514.274
6.26403	476.894	467.366	486.422
6.81208	466.633	454.173	479.093
7.16084	459.304	447.577	471.031
7.60924	475.428	462.236	488.621
8.05764	500.348	477.627	523.069
8.57248	507.677	498.882	516.473
9.25338	517.206	506.212	528.2
9.91768	537.728	526.001	549.455
10.4159	541.392	528.933	553.852
11.5286	529.665	520.87	538.461
12.0601	520.87	508.41	533.33



12.6579	495.951	484.956	506.945
13.2558	482.758	471.764	493.752
13.8371	464.434	450.509	478.36
14.2356	459.304	447.577	471.031
14.8833	472.497	460.77	484.224
16.2617	518.671	502.547	534.796
16.7766	520.87	503.28	538.461
17.2914	510.609	495.218	526.001
17.8229	490.087	467.366	512.808
18.6366	460.037	445.378	474.695
19.4504	433.651	414.595	452.707
20.0815	421.924	407.265	436.583
20.696	410.197	394.073	426.322
21.5928	410.93	388.942	432.918
22.5394	413.862	390.408	437.316
24.3496	406.533	386.743	426.322
26.1598	396.271	372.818	419.725
27.7707	380.88	356.693	405.067
29.9629	344.233	328.109	360.358
31.2915	336.904	319.313	354.494
33.2678	342.034	322.245	361.824
35.2939	337.637	316.382	358.892



Universidad de Cuenca

36.0579	335.438	324.444	346.432
38.9476	317.115	303.189	331.04
42.103	305.388	289.996	320.779
45.5242	276.07	252.616	299.524
48.0153	240.889	227.697	254.082
50.1411	221.833	203.51	240.157
52.6654	215.97	201.311	230.628
55.4887	219.634	209.373	229.895
57.5812	229.163	215.237	243.088
59.9561	227.697	209.373	246.02
62.414	215.97	202.777	229.163
65.9016	194.715	177.857	211.572
69.987	188.118	169.795	206.442

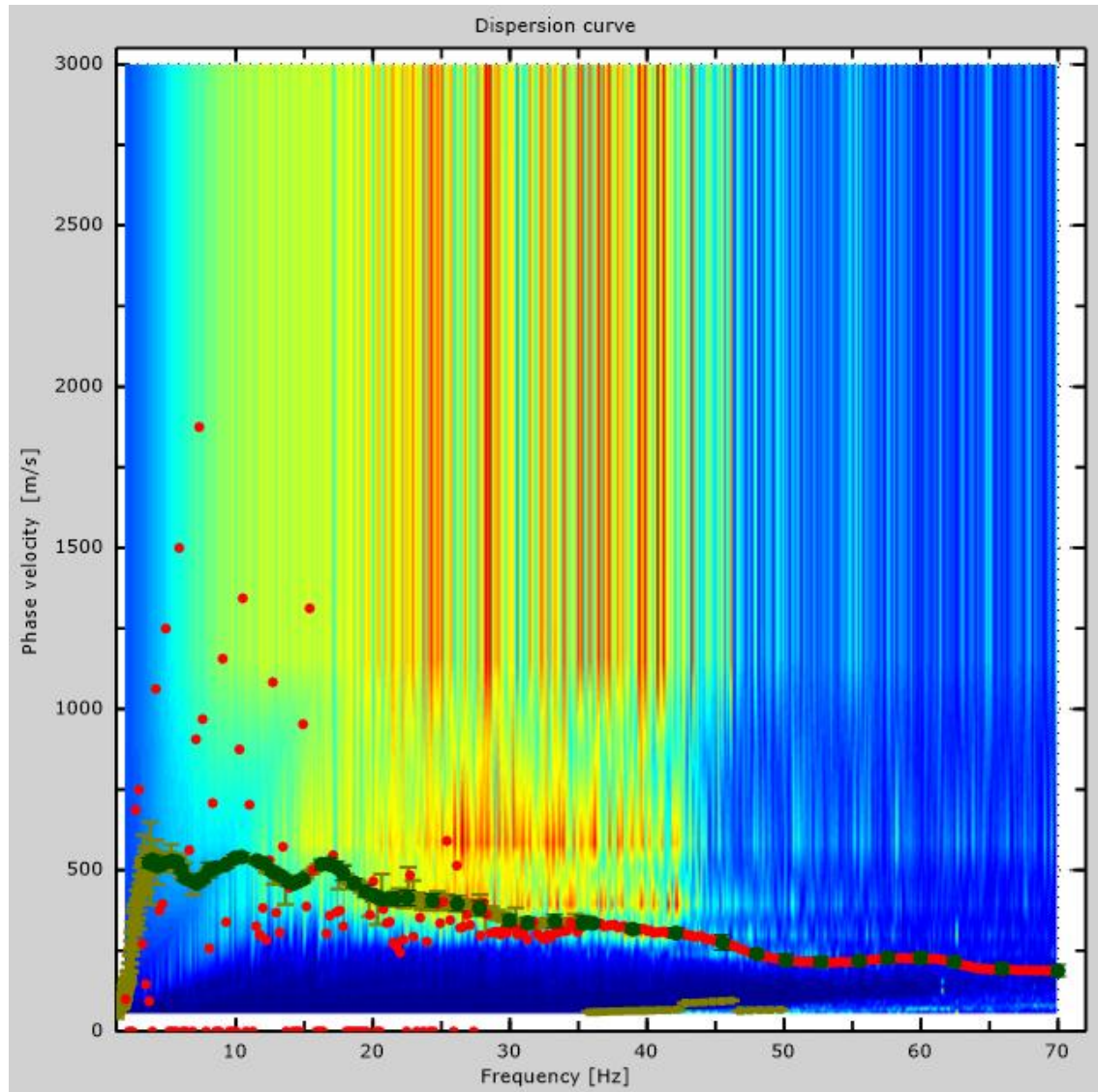


Figure 6: Dispersion curve



6 - Field profile

Number of layers (half-space excluded)	9
Receivers spacing.....	1m
Number of receivers.....	18
Number of modes.....	1

Layer 1

h [m]	0.5
z [m]	-0.5
Density [kg/m ³].....	1604
Poisson	0.2
Vs [m/s]	209
Vp [m/s]	341
Vs min [m/s].....	105
Vs max [m/s]	418
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	209

Layer 2

h [m]	2.5
z [m]	-3
Density [kg/m ³].....	1933
Poisson	0.35
Vs [m/s]	224
Vp [m/s]	466
Vs min [m/s].....	186
Vs max [m/s]	336
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	224

Layer 3

h [m]	5
z [m]	-8
Density [kg/m ³].....	2053
Poisson	0.36
Vs [m/s]	561
Vp [m/s]	1199
Vs min [m/s].....	226
Vs max [m/s]	842



This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]561

Layer 4

h [m]4

z [m]-12

Density [kg/m³].....2053

Poisson0.36

Vs [m/s].....561

Vp [m/s]1199

Vs min [m/s].....256

Vs max [m/s]842

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]561

Layer 5

h [m]4

z [m]-16

Density [kg/m³].....2053

Poisson0.36

Vs [m/s].....561

Vp [m/s]1199

Vs min [m/s].....268

Vs max [m/s]842

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]561

Layer 6

h [m]5

z [m]-21

Density [kg/m³].....2078

Poisson0.36

Vs [m/s].....589

Vp [m/s]1259

Vs min [m/s].....294

Vs max [m/s]1177

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]589



Layer 7

h [m]	5
z [m]	-26
Density [kg/m ³].....	2056
Poisson	0.36
Vs [m/s].....	564
Vp [m/s]	1206
Vs min [m/s].....	282
Vs max [m/s].....	1128
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	564

Layer 8

h [m]	6
z [m]	-32
Density [kg/m ³].....	2024
Poisson	0.36
Vs [m/s].....	530
Vp [m/s]	1133
Vs min [m/s].....	265
Vs max [m/s].....	795
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	530

Layer 9

h [m]	0
z [m]	-00
Density [kg/m ³].....	2071
Poisson	0.36
Vs [m/s].....	581
Vp [m/s]	1242
Vs min [m/s].....	291
Vs max [m/s].....	1162
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	581

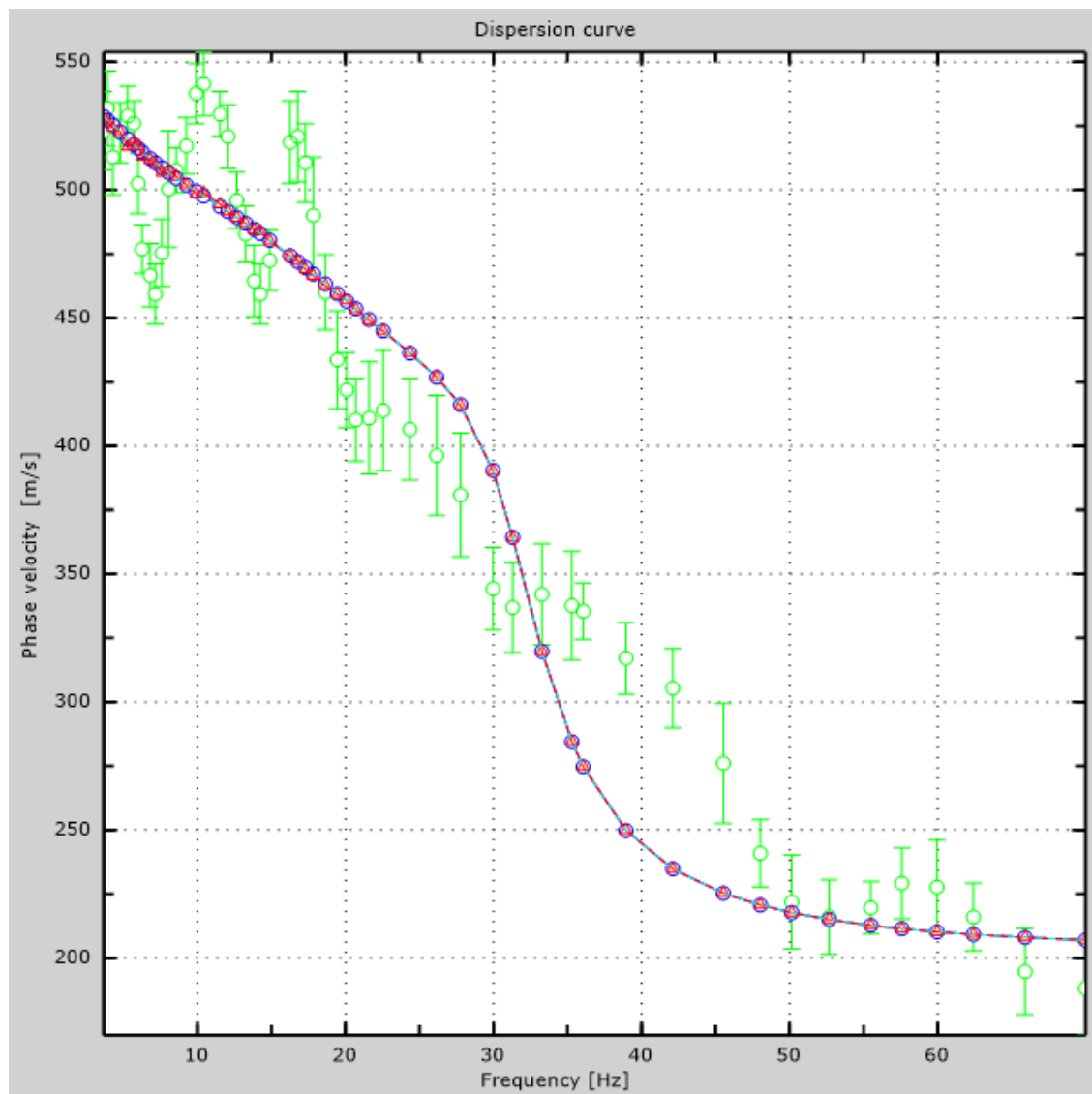


Figure 7: Numerical velocities - experimental points (green), Rayleigh modes (cyan), apparent curve (blue), numerical curve (red)

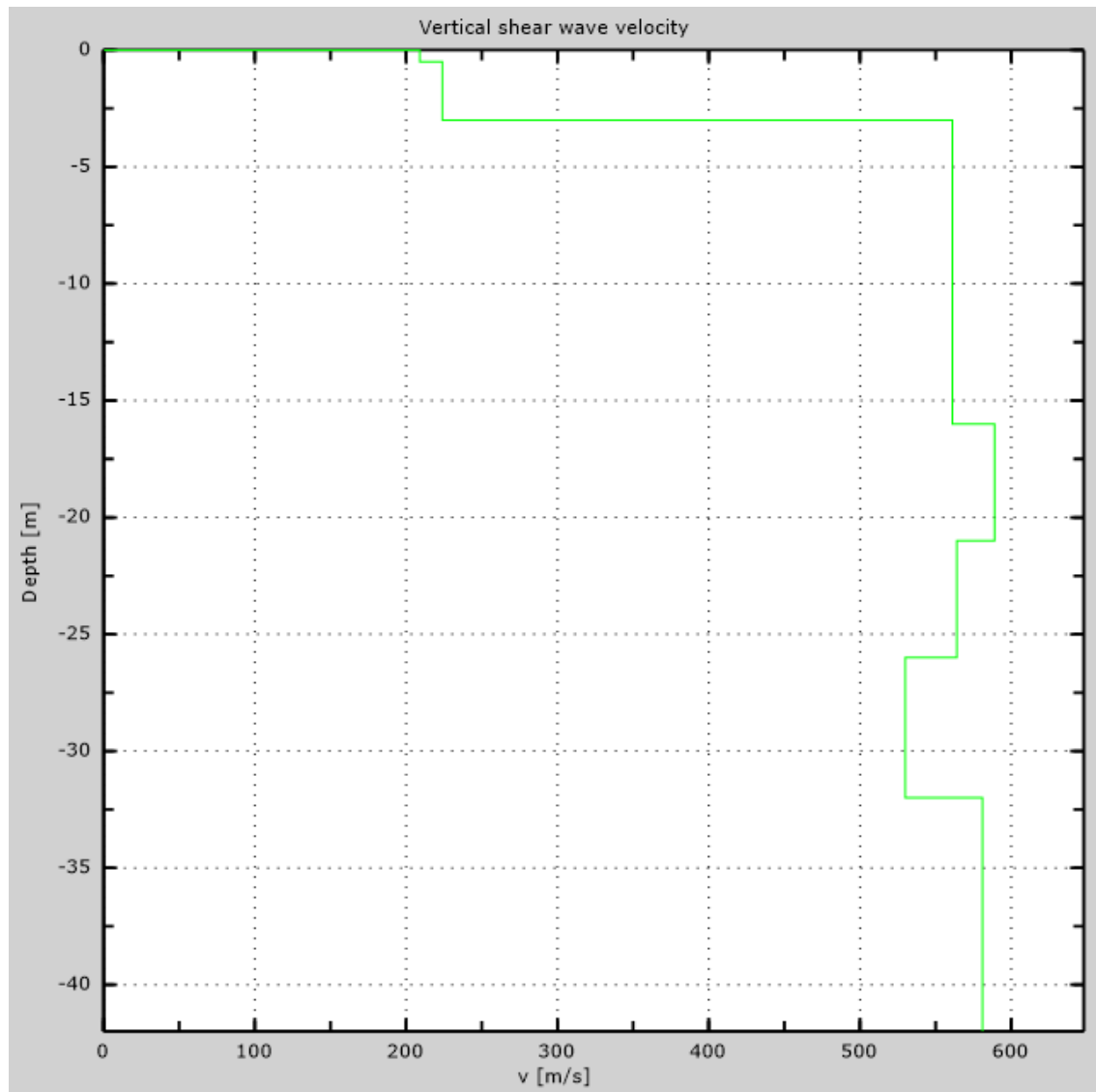


Figure 8: Numerical Vs profile



7 - Final results

Reference plane $z=0$ [m]0

V_{s30} [m/s]486

You are using the definitions included in DM 14 gennaio 2008

The site does belongs to classes A, B, C, D, E or S1 (alluvional soil, gravel, sand, silt, clay, rock).

The site is not susceptible to liquefaction or there is not sensitive clay.

The geotechnic unit 2 is the bed rock

Soil type**S2**

Appendix

Type of ground

Type A: Rock or other rock-like geological formation, including at most 3 m of weaker material at the surface

Type B: Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least 30 m in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth, V_{s30} between 360 m/s and 800 m/s

Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with thickness greater than 30 m, V_{s30} between 180 m/s and 360 m/s

Type D: Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil with thickness greater than 30 m, V_{s30} lower than 180 m/s

Type E: A soil profile consisting of a surface alluvium layer with v_s values of type C or D and thickness lower than 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s

Type S1: Deposits of soils with $V_{s30} < 100$ m/s (or $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), which include a layer of fine-grained and low consistency soil with a thickness greater than 8 m, or a layer of peat or highly organic clay with a thickness greater than 3 m.

Type S2: Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A - E or S1



MASW Analysis Report

Author: JUAN FERNANDO AVILÉS, BRYAN BARZALLO
Site: Plaza San Francisco
Date: 19/Nov/2015



1 - Experimental data

Traces file name

\\PORT1ASUS\GEOF_asus\TESIS_AVILES\LM3\MASW\RES\SKYM2445_3D
.dat

Number of sensors..... 12

Sensors distance:0m

Number of time samples 16464

Acquisition timestep 0.125ms

Number of sensors used for the analysis..... 12

The interval considered for the analysis starts at 0ms

The interval considered for the analysis ends at 2057.88ms

Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

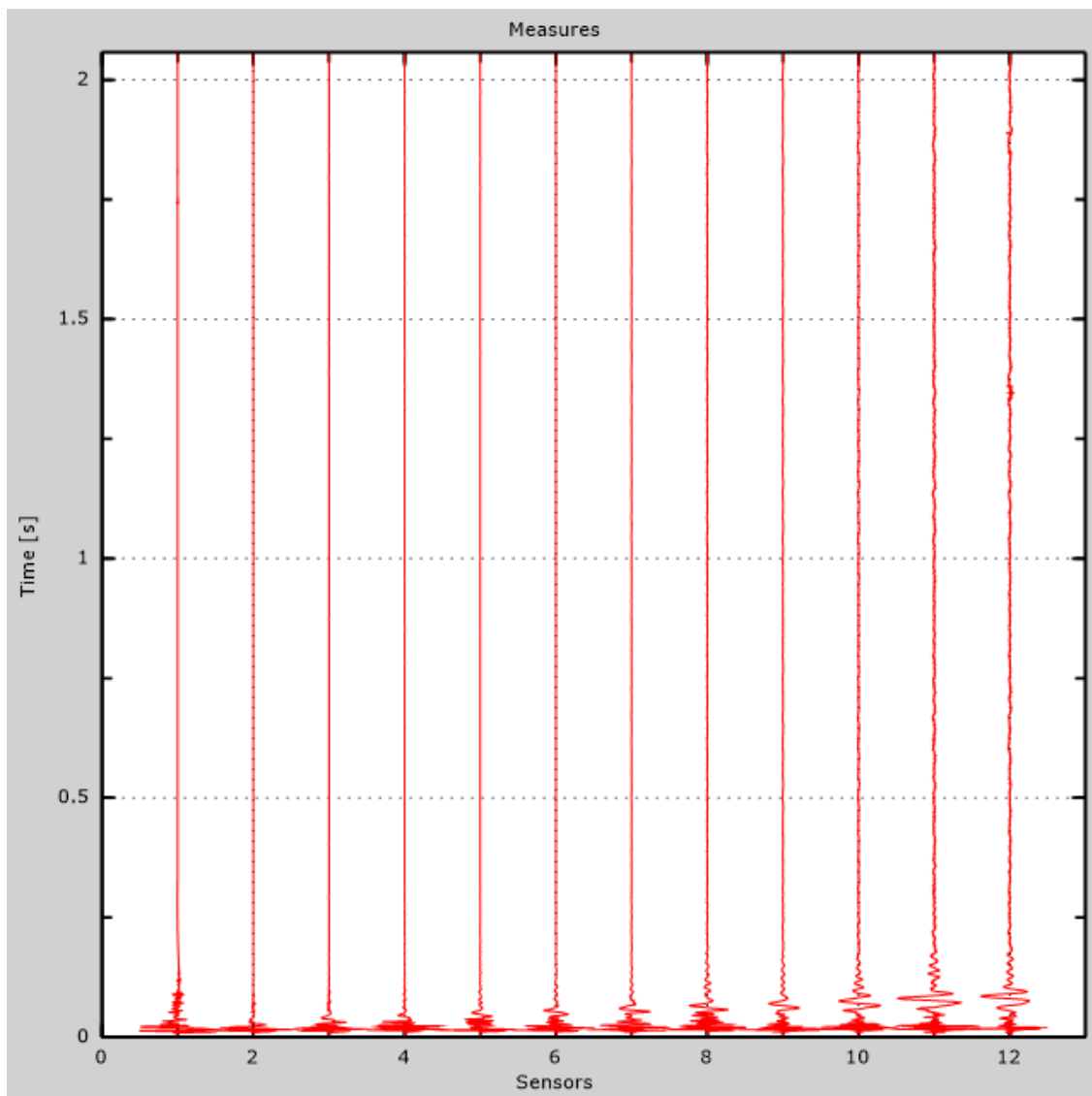


Figure 1: Experimental traces

2 - Analysis results

Final frequency..... 70Hz

Initial frequency 2Hz

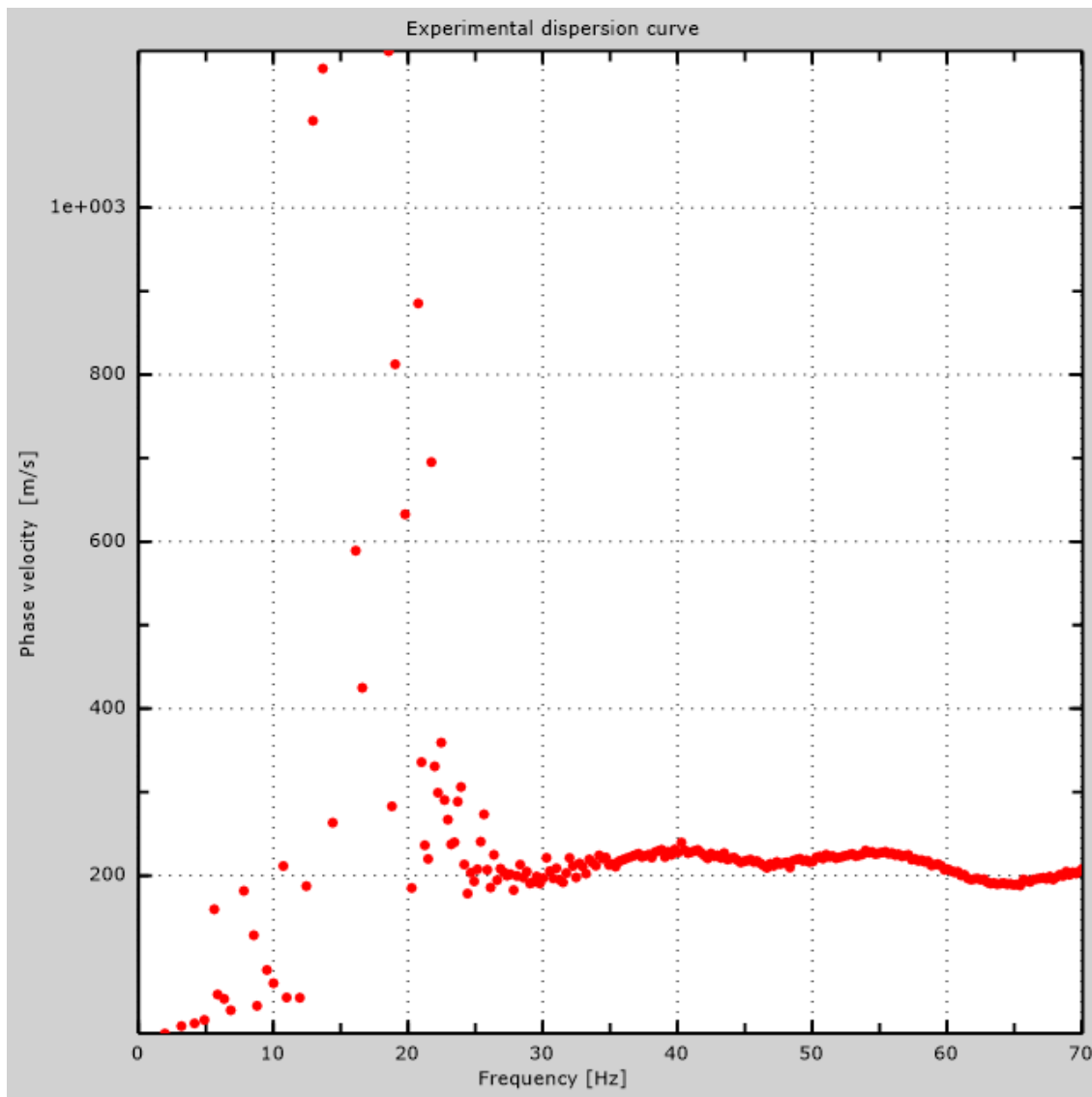


Figure 2: Experimental dispersion curve

3 - Analysis results (P)

Traces file name

.\PORT1ASUS\GEOF_asus\TESIS_AVILES\LM3\REMI\SKYM3420.dat

Number of sensors.....24

Number of time samples3.26787e-312

Acquisition timestep2ms

Number of sensors used for the analysis.....24

The interval considered for the analysis starts at0ms

The interval considered for the analysis ends at65534ms

Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

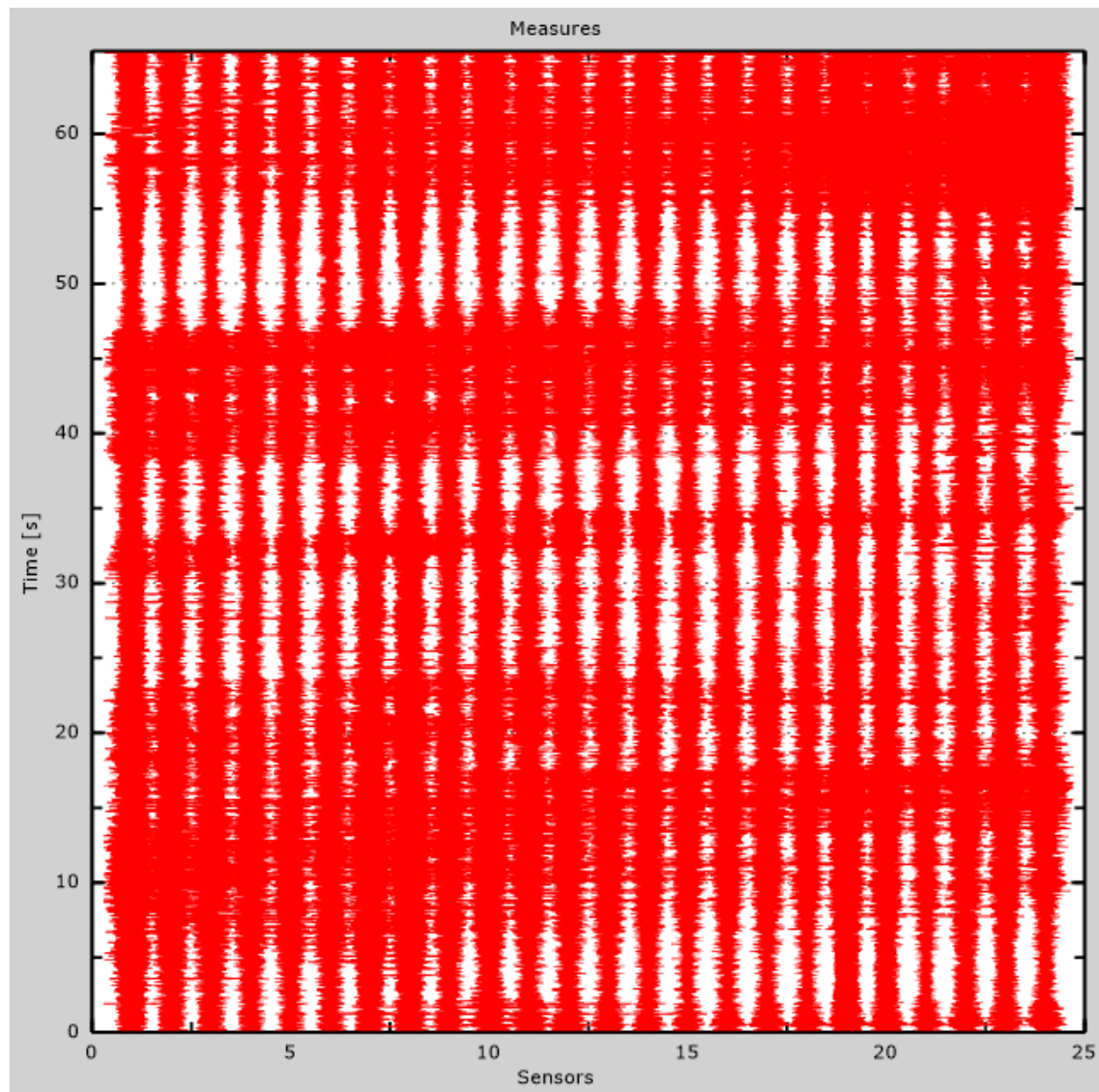


Figure 3: Experimental traces



4 - ESAC analysis

Traces file name

. \\PORT1ASUS\GEOF_asus\TESIS_AVILES\LM3\ESAC\SKYN0804.dat

Number of sensors..... 12

Number of time samples 360448

Acquisition timestep 2ms

The interval considered for the analysis starts at 0ms

The interval considered for the analysis ends at 720894ms

Window duration..... 10s

Overlap..... 0s

Smoothing 0.1

Cleaning threshold..... 0sd

Number of iterations 2

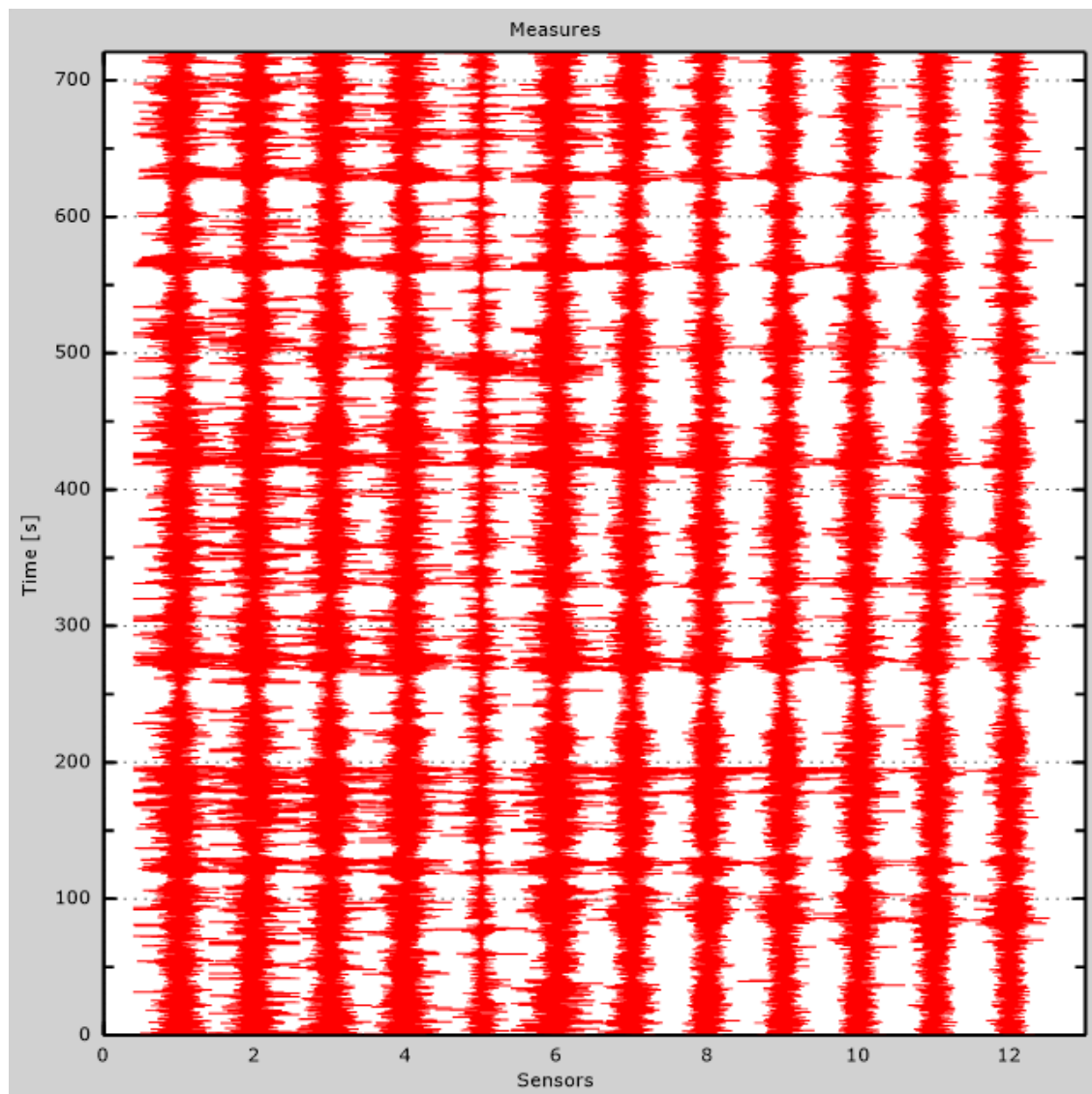


Figure 4: Experimental traces



Table 1: Geophones positions

X [m]	Y [m]
0	0
0	-3
0	-6
0	-9
0	-12
0	-15
-2	-15
-4	-15
-6	-15
-8	-15
-10	-15

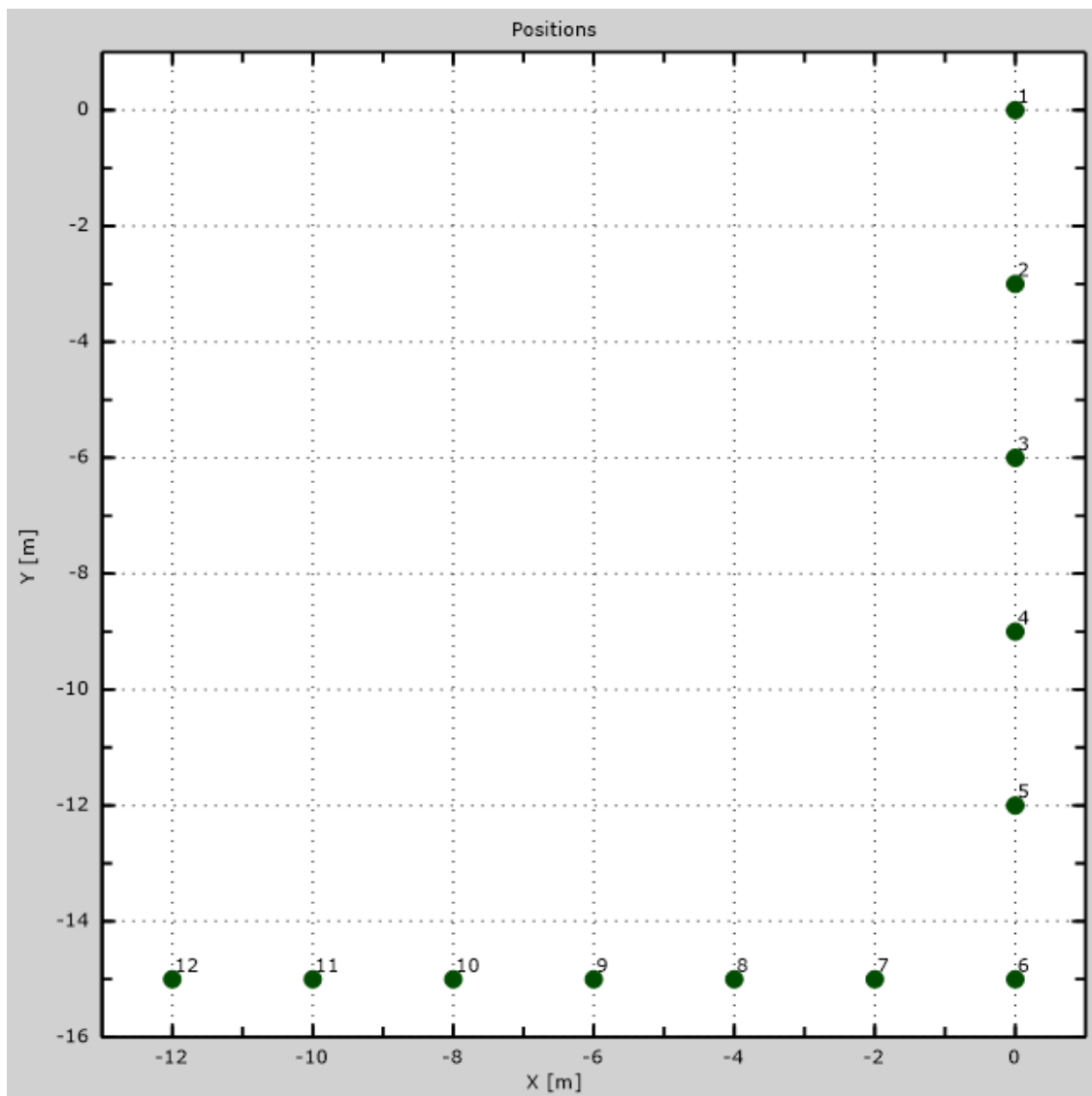


Figure 5: Geophones positions

5 - Dispersion curve

Table 2: Dispersion curve

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
9.18784	378.089	352.919	403.26
9.76532	390.981	365.197	416.766
10.4294	371.336	344.325	398.348
10.9203	369.495	345.552	393.437
11.5555	374.406	348.008	400.804
12.0752	349.236	322.838	375.634
12.5083	330.819	311.174	350.464
12.9992	304.421	286.004	322.838
13.4323	286.617	268.814	304.421
14.0675	274.339	260.833	287.845
14.7316	272.498	259.606	285.39
15.3091	264.517	252.239	276.795
16.0598	248.555	235.049	262.061
17.0127	236.891	225.841	247.941
17.7923	231.98	222.157	241.802
18.3409	229.524	220.93	238.119
19.1494	229.524	219.702	239.347
19.698	225.841	214.177	237.505



20.5931	221.543	213.563	229.524
21.1994	210.493	198.829	222.157
22.0656	203.126	189.006	217.246
22.903	200.671	189.62	211.721
23.6537	200.671	185.937	215.404
24.3467	197.601	187.779	207.424
25.184	196.987	185.937	208.038
26.1657	200.057	182.867	217.246
27.2918	201.285	185.937	216.632
28.5623	199.443	185.323	213.563
30.1792	196.987	181.026	212.949
31.5074	200.057	182.867	217.246
33.5863	208.651	193.304	223.999
35.3188	214.791	203.126	226.455
36.7625	225.841	215.404	236.277
38.9858	229.524	220.93	238.119
40.6893	230.752	221.543	239.961
42.6816	223.999	216.632	231.366
43.8655	222.157	214.791	229.524
45.0493	218.474	209.265	227.683
46.8972	214.791	204.968	224.613
49.005	220.93	211.721	230.138



51.6037	222.771	211.721	233.822
53.3361	222.157	212.335	231.98
54.8536	227.56	219.229	235.891
56.1445	224.53	213.927	235.133
57.4219	221.501	210.14	232.861
58.3324	217.714	205.596	229.832
59.5147	213.927	206.354	221.501
60.792	205.596	194.993	216.199
61.8792	198.78	187.419	210.14
63.4827	191.206	182.118	200.295
64.6242	191.964	179.088	204.839
65.7113	196.508	184.39	208.626
66.8664	198.78	188.177	209.383
67.872	199.537	185.147	213.927
68.8232	205.596	195.75	215.442
69.9919	210.14	199.537	220.744

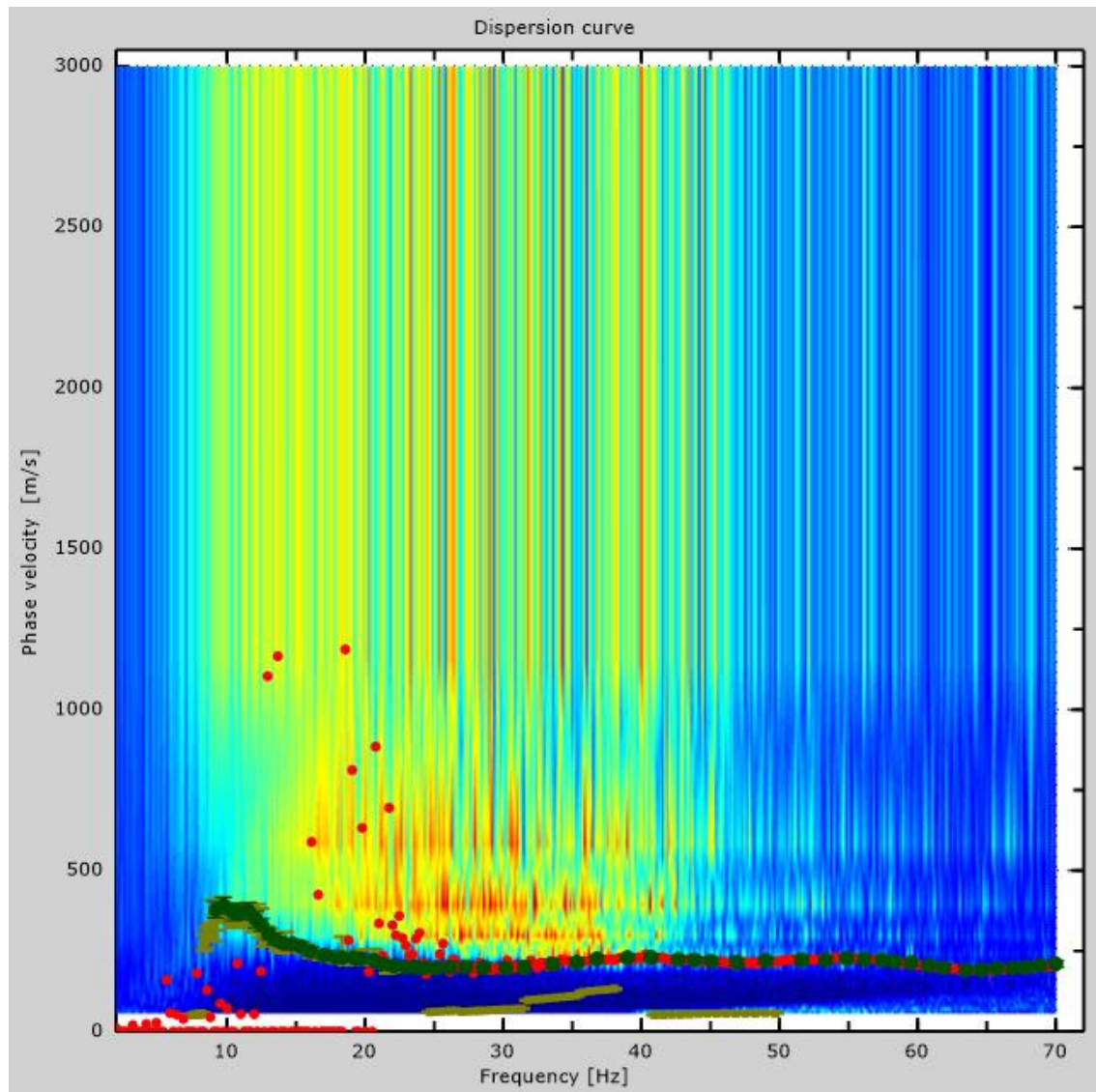


Figure 6: Dispersion curve

6 - Field profile

Number of layers (half-space excluded)	9
Receivers spacing.....	1m
Number of receivers	12
Number of modes	1

Layer 1

h [m]	2
z [m]	-2
Density [kg/m ³].....	1628
Poisson	0.3
Vs [m/s]	222
Vp [m/s]	415
Vs min [m/s].....	111
Vs max [m/s]	443
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	222

Layer 2

h [m]	2
z [m]	-4
Density [kg/m ³].....	1628
Poisson	0.3
Vs [m/s]	222
Vp [m/s]	415
Vs min [m/s].....	111
Vs max [m/s]	333
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	222

Layer 3

h [m]	4
z [m]	-8
Density [kg/m ³].....	1719
Poisson	0.3
Vs [m/s]	276
Vp [m/s]	516
Vs min [m/s].....	138



Vs max [m/s]	414
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	276

Layer 4

h [m]	7
z [m]	-15
Density [kg/m ³].....	1888
Poisson	0.3
Vs [m/s]	407
Vp [m/s]	761
Vs min [m/s].....	184
Vs max [m/s]	611
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	407

Layer 5

h [m]	7
z [m]	-22
Density [kg/m ³].....	1910
Poisson	0.3
Vs [m/s]	420
Vp [m/s]	786
Vs min [m/s].....	206
Vs max [m/s]	630
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	420

Layer 6

h [m]	4
z [m]	-26
Density [kg/m ³].....	1910
Poisson	0.3
Vs [m/s]	420
Vp [m/s]	786
Vs min [m/s].....	210
Vs max [m/s]	840
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	420



Layer 7

h [m]	5
z [m]	-31
Density [kg/m ³].....	1910
Poisson	0.3
Vs [m/s].....	420
Vp [m/s]	786
Vs min [m/s].....	210
Vs max [m/s]	840
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	420

Layer 8

h [m]	6
z [m]	-37
Density [kg/m ³].....	1910
Poisson	0.3
Vs [m/s].....	420
Vp [m/s]	786
Vs min [m/s].....	210
Vs max [m/s]	840
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	420

Layer 9

h [m]	0
z [m]	-∞
Density [kg/m ³].....	1910
Poisson	0.3
Vs [m/s].....	420
Vp [m/s]	786
Vs min [m/s].....	210
Vs max [m/s]	840
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	420

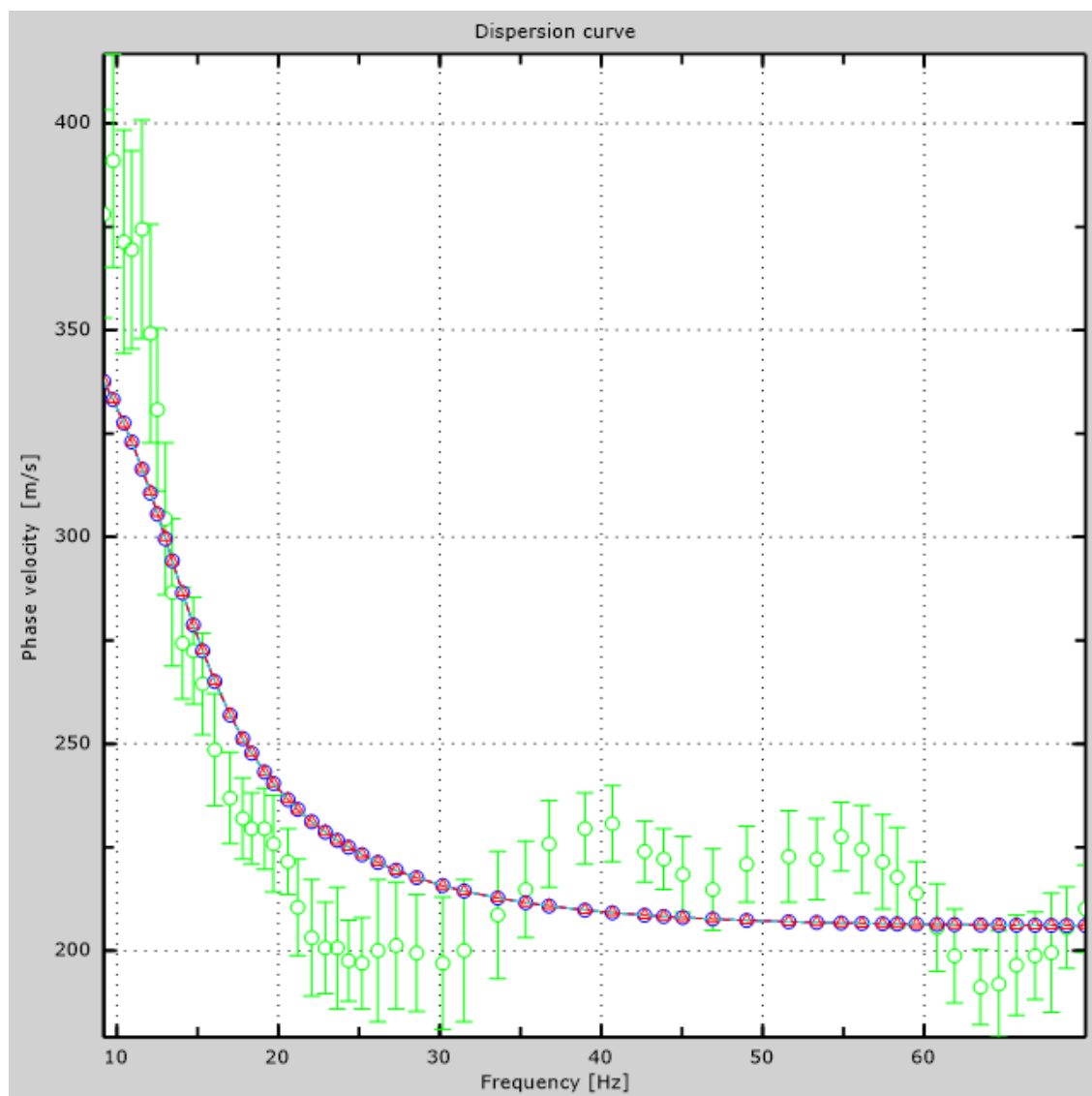


Figure 7: Numerical velocities - experimental points (green), Rayleigh modes (cyan), apparent curve (blue), numerical curve (red)

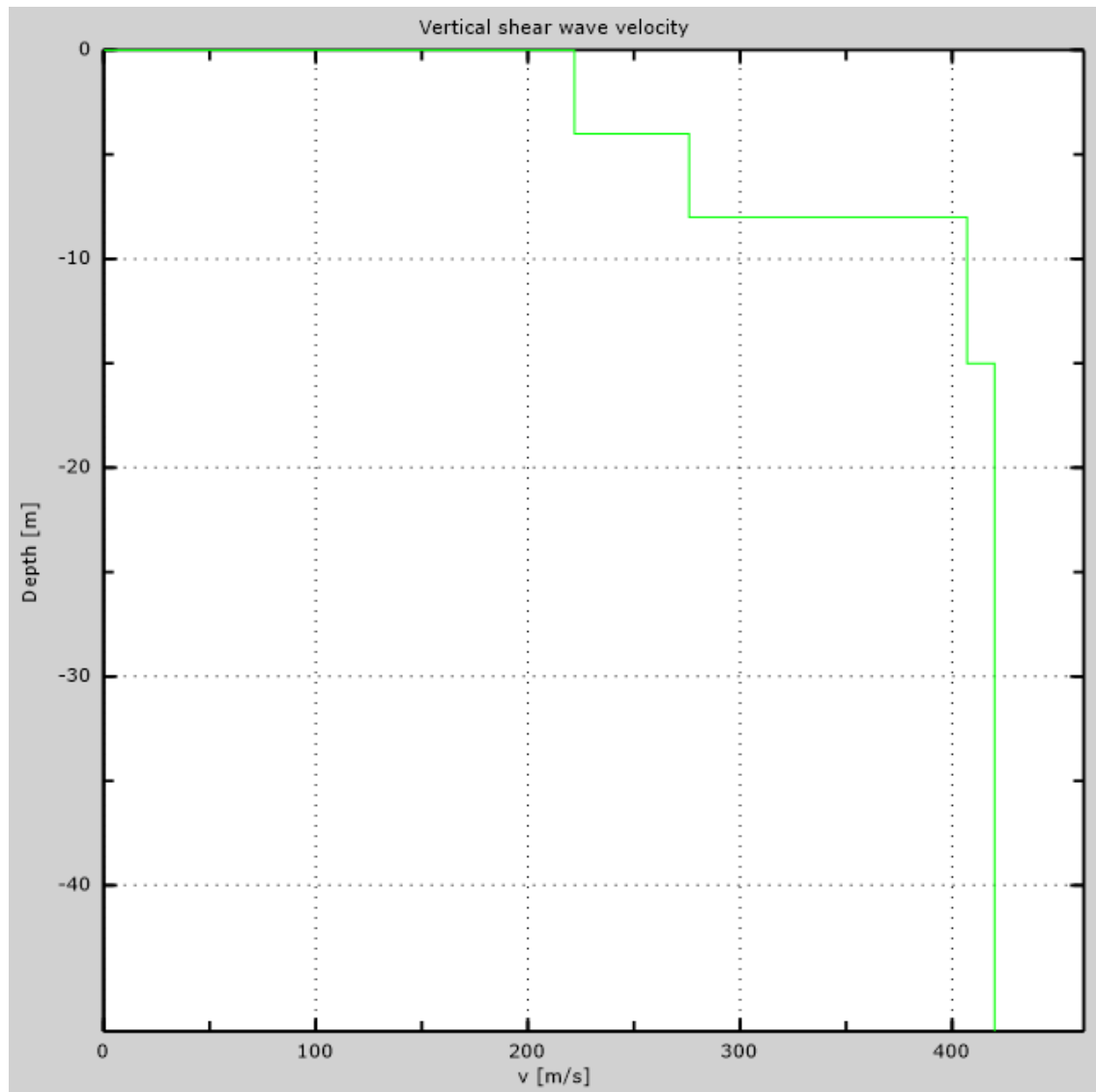


Figure 8: Numerical Vs profile



7 - Final results

Reference plane $z=0$ [m]0

V_{s30} [m/s]351

You are using the definitions included in DM 14 gennaio 2008

The site does belongs to classes A, B, C, D, E or S1 (alluvional soil, gravel, sand, silt, clay, rock).

The site is not susceptible to liquefaction or there is not sensitive clay.

The geotechnic unit 3 is the bed rock

The mechanic characteristics of the layers don't improve improve gradually with depth

Soil type**S2**

Appendix

Type of ground

Type A: Rock or other rock-like geological formation, including at most 3 m of weaker material at the surface

Type B: Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least 30 m in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth, V_{s30} between 360 m/s and 800 m/s

Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with thickness greater than 30 m, V_{s30} between 180 m/s and 360 m/s

Type D: Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil with thickness greater than 30 m, V_{s30} lower than 180 m/s

Type E: A soil profile consisting of a surface alluvium layer with v_s values of type C or D and thickness lower than 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s

Type S1: Deposits of soils with $V_{s30} < 100$ m/s (or $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), which include a layer of fine-grained and low consistency soil with a thickness greater than 8 m, or a layer of peat or highly organic clay with a thickness greater than 3 m.

Type S2: Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A - E or S1



MASW Analysis Report

Author: JUAN FERNANDO AVILÉS, BRYAN BARZALLO
Site: Colegio J. Calle
Date: 19/Nov/2015

Generated by MASW
(c) Vitantonio Roma. All rights reserved.



1 - Experimental data

Traces file name G:\Nueva
carpeta\TESIS_AVILES\LM4\MASW\RES\SKYP0909.dat
Number of sensors..... 24
Sensors distance: 0m
Number of time samples 16464
Acquisition timestep 0.125ms
Number of sensors used for the analysis..... 24
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 2057.88ms
Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

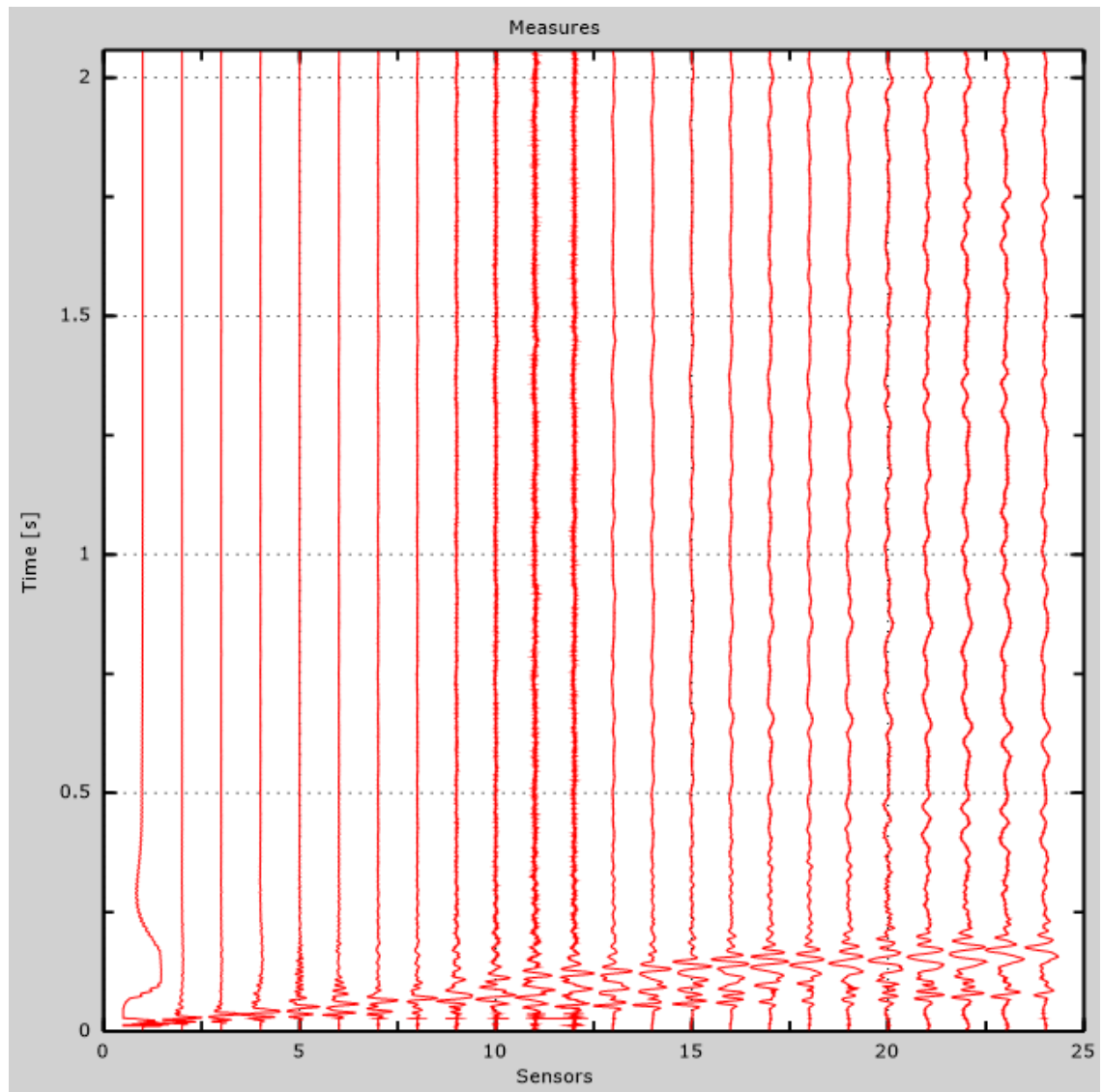


Figure 1: Experimental traces

2 - Analysis results

Final frequency..... 70Hz

Initial frequency 2Hz

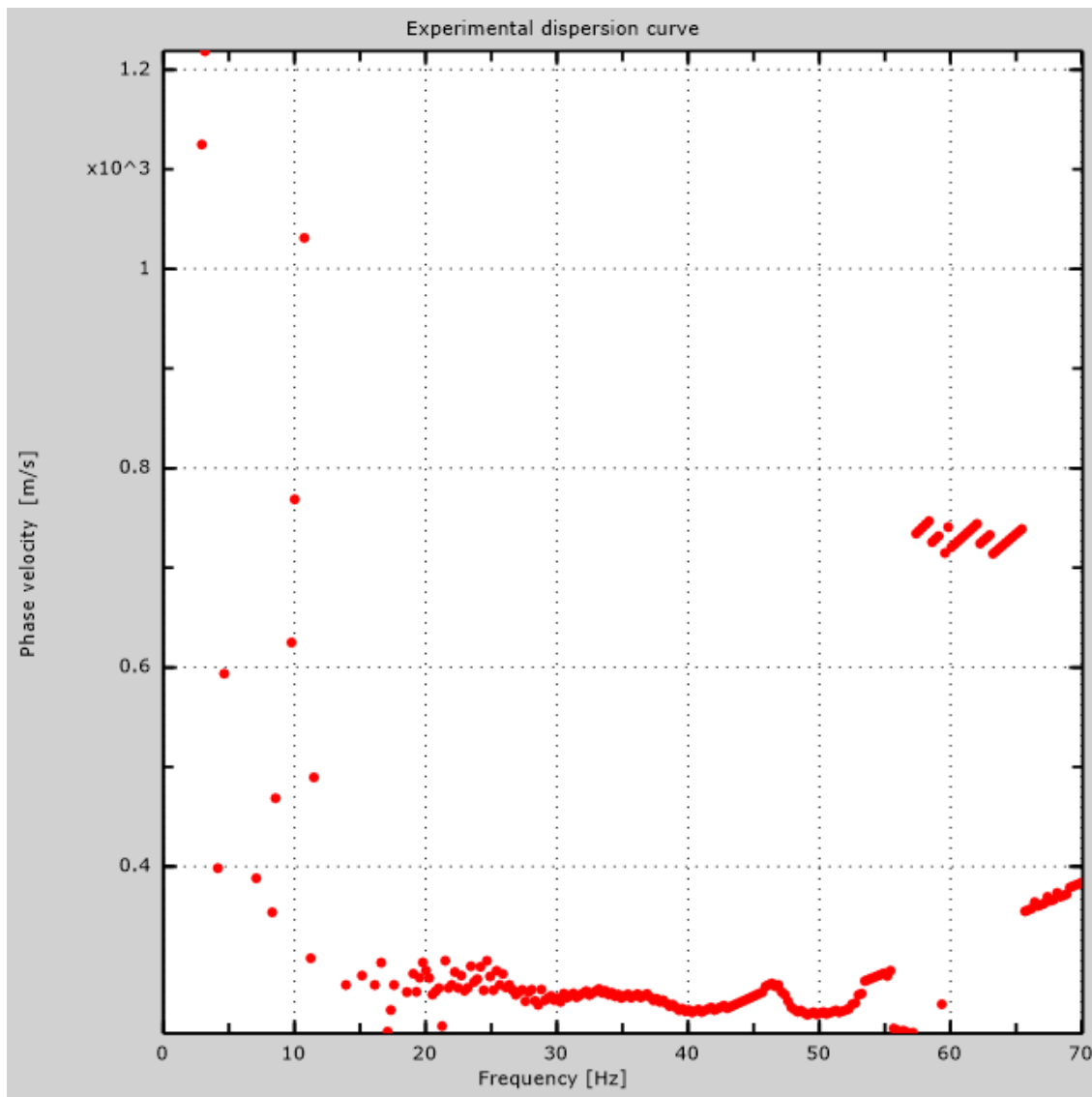


Figure 2: Experimental dispersion curve

3 - Analysis results (P)

Traces file name G:\Nueva carpeta\TESIS_AVILES\LM4\REMI\SKYP2108.dat

Number of sensors..... 24

Number of time samples 3.26787e-312

Acquisition timestep 2ms

Number of sensors used for the analysis..... 24

The interval considered for the analysis starts at 0ms

The interval considered for the analysis ends at 65534ms

Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

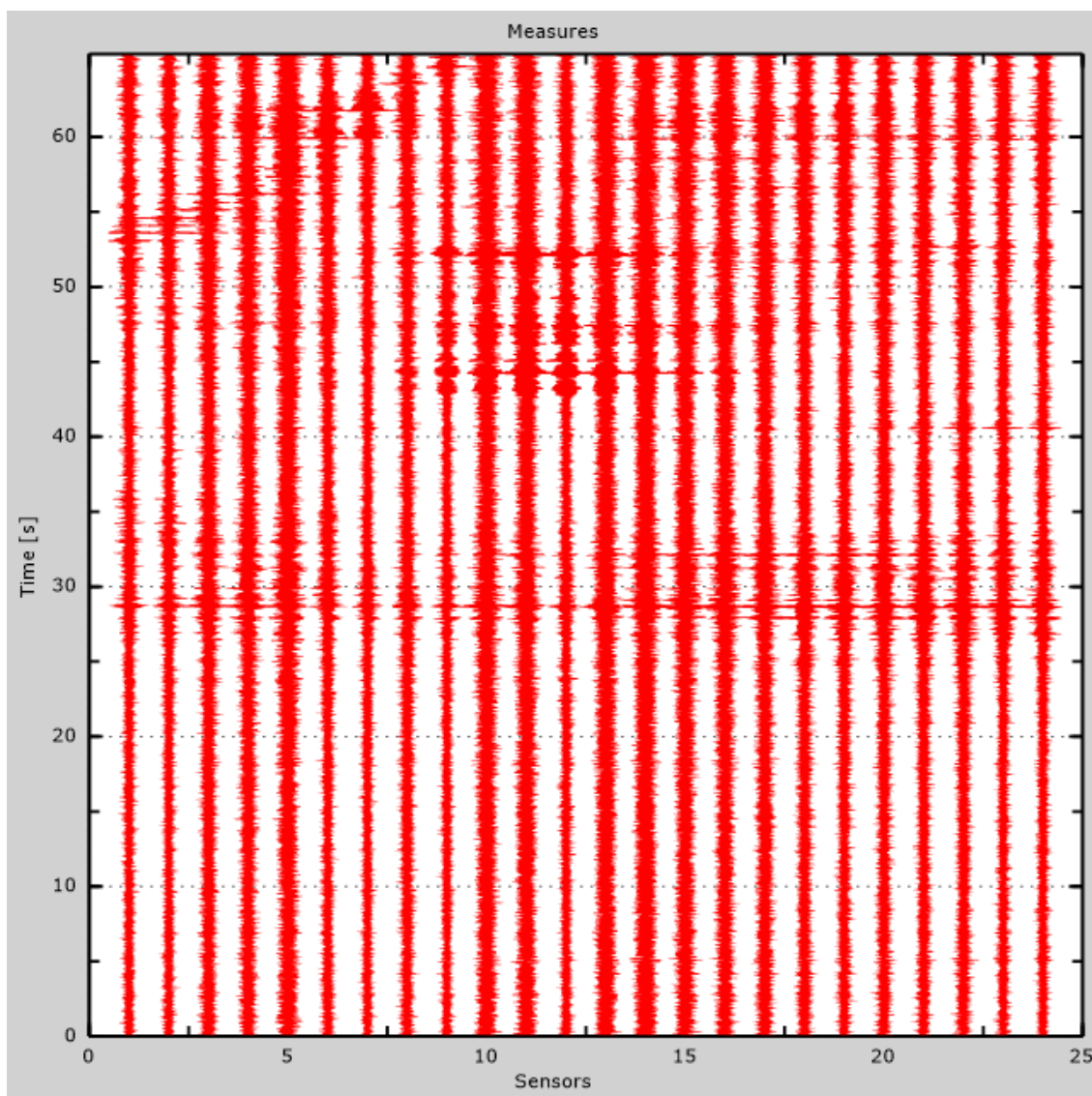


Figure 3: Experimental traces



4 - ESAC analysis

Traces file name G:\Nueva carpeta\TESIS_AVILES\LM4\ESAC\SKYP5657.dat
Number of sensors..... 12
Number of time samples 360448
Acquisition timestep 2ms
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 720894ms
Window duration..... 10s
Overlap..... 0s
Smoothing 0.1
Cleaning threshold..... 0sd
Number of iterations 2

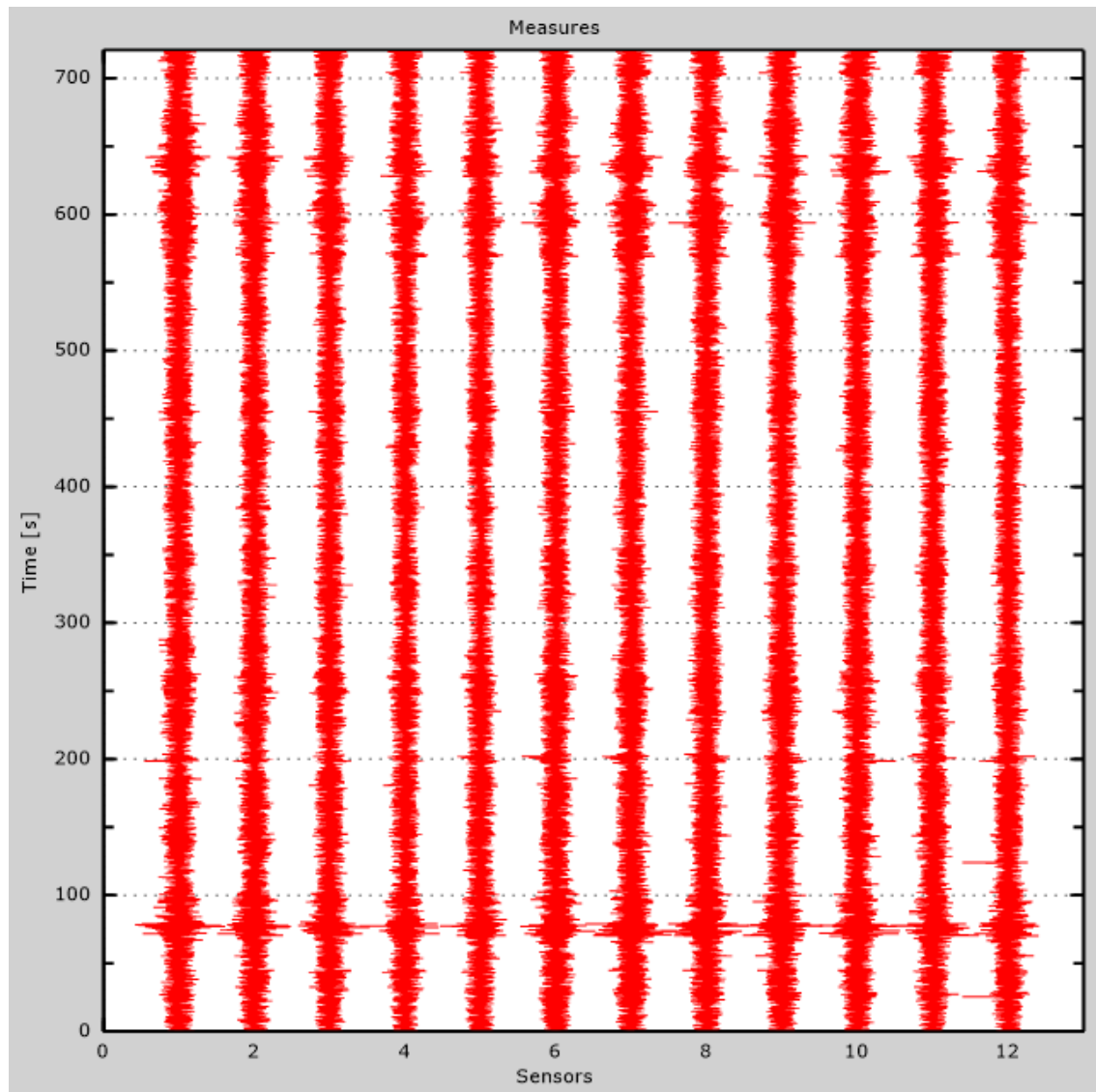


Figure 4: Experimental traces



Table 1: Geophones positions

X [m]	Y [m]
0	0
0	-5
0	-10
0	-15
0	-20
0	-25
5	-25
10	-25
15	-25
20	-25
25	-25

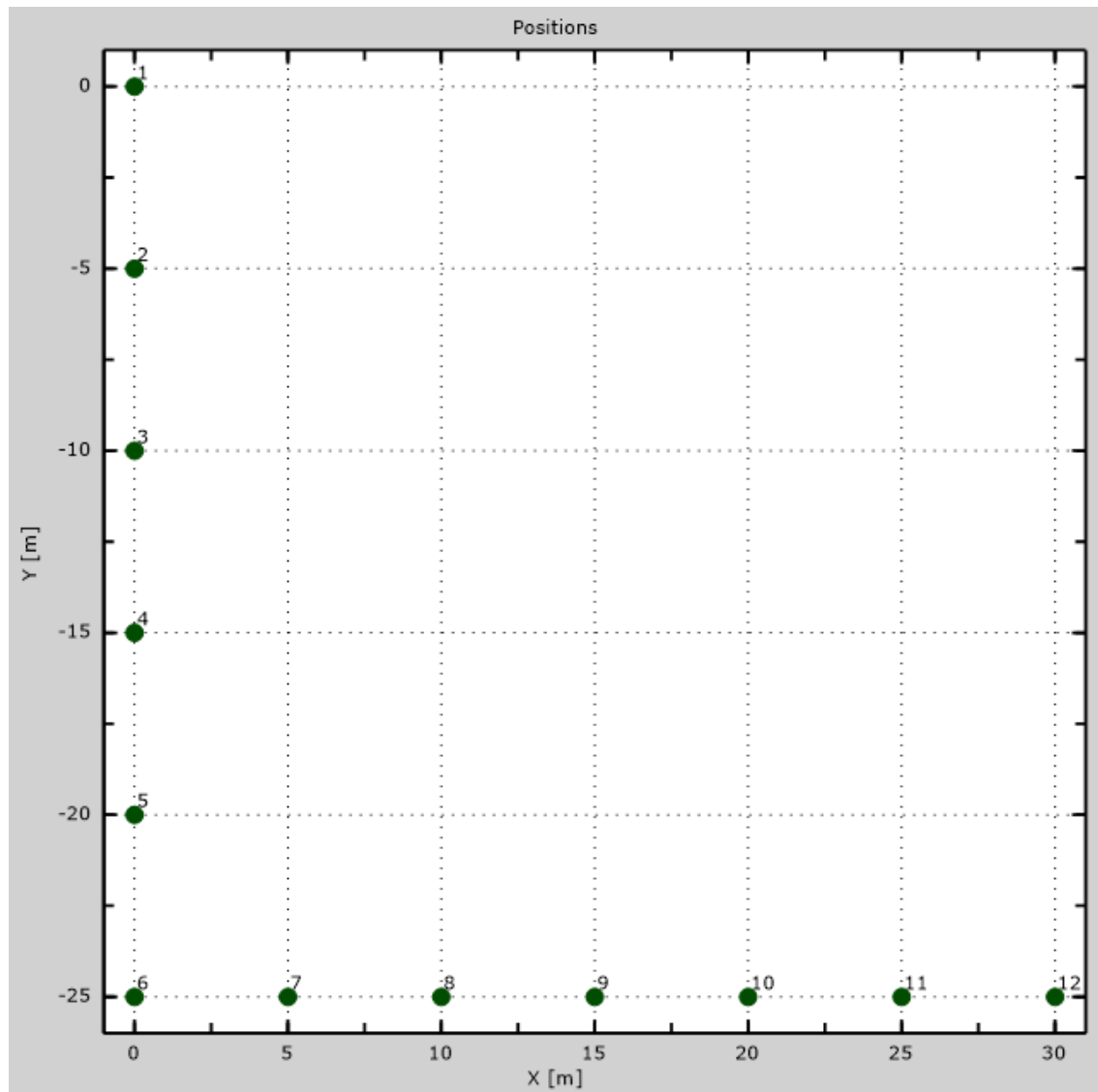


Figure 5: Geophones positions

5 - Dispersion curve

Table 2: Dispersion curve

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
2.78441	468.619	460.791	476.448
3.00302	456.094	448.787	463.4
3.13419	438.87	431.042	446.699
3.30908	424.257	418.516	429.998
3.49855	411.209	405.468	416.95
3.71716	400.249	397.639	402.858
3.93577	390.332	386.679	393.986
4.15438	376.241	372.065	380.416
4.34385	363.193	358.495	367.89
4.60618	357.973	354.842	361.105
4.75193	345.969	344.404	347.535
4.8248	337.097	332.922	341.272
5.48063	332.922	325.615	340.228
5.97616	322.483	318.308	326.659
6.58827	308.913	304.216	313.611
7.3607	314.655	309.957	319.352
8.87642	300.041	295.866	304.216
10.9897	296.388	291.69	301.085



13.2534	296.096	276.66	315.532
15.1727	292.394	278.511	306.277
17.2542	277.585	265.553	289.617
18.5248	277.585	265.553	289.617
19.2844	279.487	266.265	292.709
20.491	273.92	262.786	285.054
21.7254	281.575	272.528	290.621
22.9597	278.791	268.353	289.229
24.4159	280.183	268.353	292.013
25.6503	277.399	269.049	285.75
26.5934	280.879	271.136	290.621
28.0912	278.791	269.744	287.837
29.5261	270.647	267.828	273.465
30.7837	269.394	265.95	272.839
31.7592	271.586	266.576	276.597
32.9346	276.91	271.273	282.546
34.1687	274.405	272.213	276.597
35.4021	272.395	269.333	275.457
36.3757	269.333	266.577	272.089
37.3494	266.271	263.515	269.027
38.3486	263.515	260.147	266.884
40.5137	255.861	254.33	257.392



41.7502	259.209	257.915	260.503
43.6858	263.308	261.366	265.249
45.4159	273.663	269.995	277.33
46.3768	283.311	281.313	285.308
47.8589	259.63	257.062	262.197
49.0674	252.211	249.073	255.35
50.5381	252.782	249.073	256.491
51.2792	255.92	255.065	256.776
52.7043	264.195	260.485	267.904
53.4674	285.626	284.213	287.038
54.4399	290.469	288.653	292.285
55.442	296.523	293.9	299.147



6 - Field profile

Number of layers (half-space excluded)	9
Receivers spacing.....	1.5m
Number of receivers	24
Number of modes	1

Layer 1

h [m]	2.5
z [m]	-2.5
Density [kg/m ³].....	1732
Poisson	0.32
Vs [m/s]	284
Vp [m/s]	552
Vs min [m/s].....	142
Vs max [m/s]	426
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	284

Layer 2

h [m]	3.5
z [m]	-6
Density [kg/m ³].....	1732
Poisson	0.42
Vs [m/s]	284
Vp [m/s]	765
Vs min [m/s].....	150
Vs max [m/s]	426
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	284

Layer 3

h [m]	4
z [m]	-10
Density [kg/m ³].....	1767
Poisson	0.42
Vs [m/s]	308
Vp [m/s]	829
Vs min [m/s].....	154



Vs max [m/s]462

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]308

Layer 4

h [m]4

z [m]-14

Density [kg/m³].....1767

Poisson0.42

Vs [m/s]308

Vp [m/s]829

Vs min [m/s].....165

Vs max [m/s]462

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]308

Layer 5

h [m]4

z [m]-18

Density [kg/m³].....1802

Poisson0.42

Vs [m/s]333

Vp [m/s]897

Vs min [m/s].....167

Vs max [m/s]667

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]333

Layer 6

h [m]5

z [m]-23

Density [kg/m³].....1802

Poisson0.42

Vs [m/s]333

Vp [m/s]897

Vs min [m/s].....172

Vs max [m/s]500

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]333



Layer 7

h [m]	5
z [m]	-28
Density [kg/m ³].....	1802
Poisson	0.42
Vs [m/s].....	333
Vp [m/s]	897
Vs min [m/s].....	22
Vs max [m/s]	500
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	333

Layer 8

h [m]	10
z [m]	-38
Density [kg/m ³].....	1802
Poisson	0.42
Vs [m/s].....	333
Vp [m/s]	897
Vs min [m/s].....	192
Vs max [m/s]	500
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	333

Layer 9

h [m]	0
z [m]	-00
Density [kg/m ³].....	2015
Poisson	0.42
Vs [m/s].....	521
Vp [m/s]	1403
Vs min [m/s].....	260
Vs max [m/s]	1041
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	521

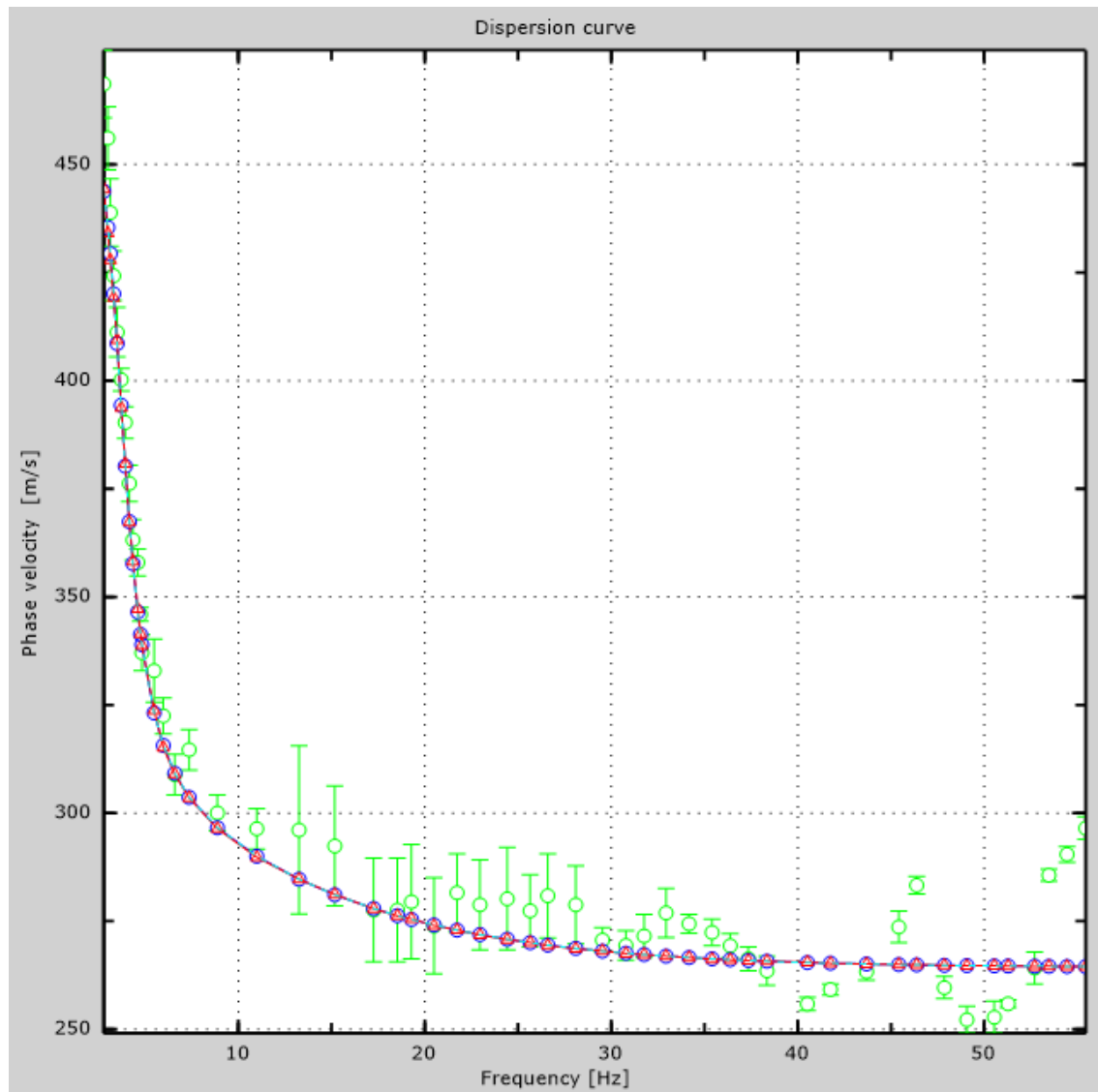


Figure 7: Numerical velocities - experimental points (green), Rayleigh modes (cyan), apparent curve (blue), numerical curve (red)

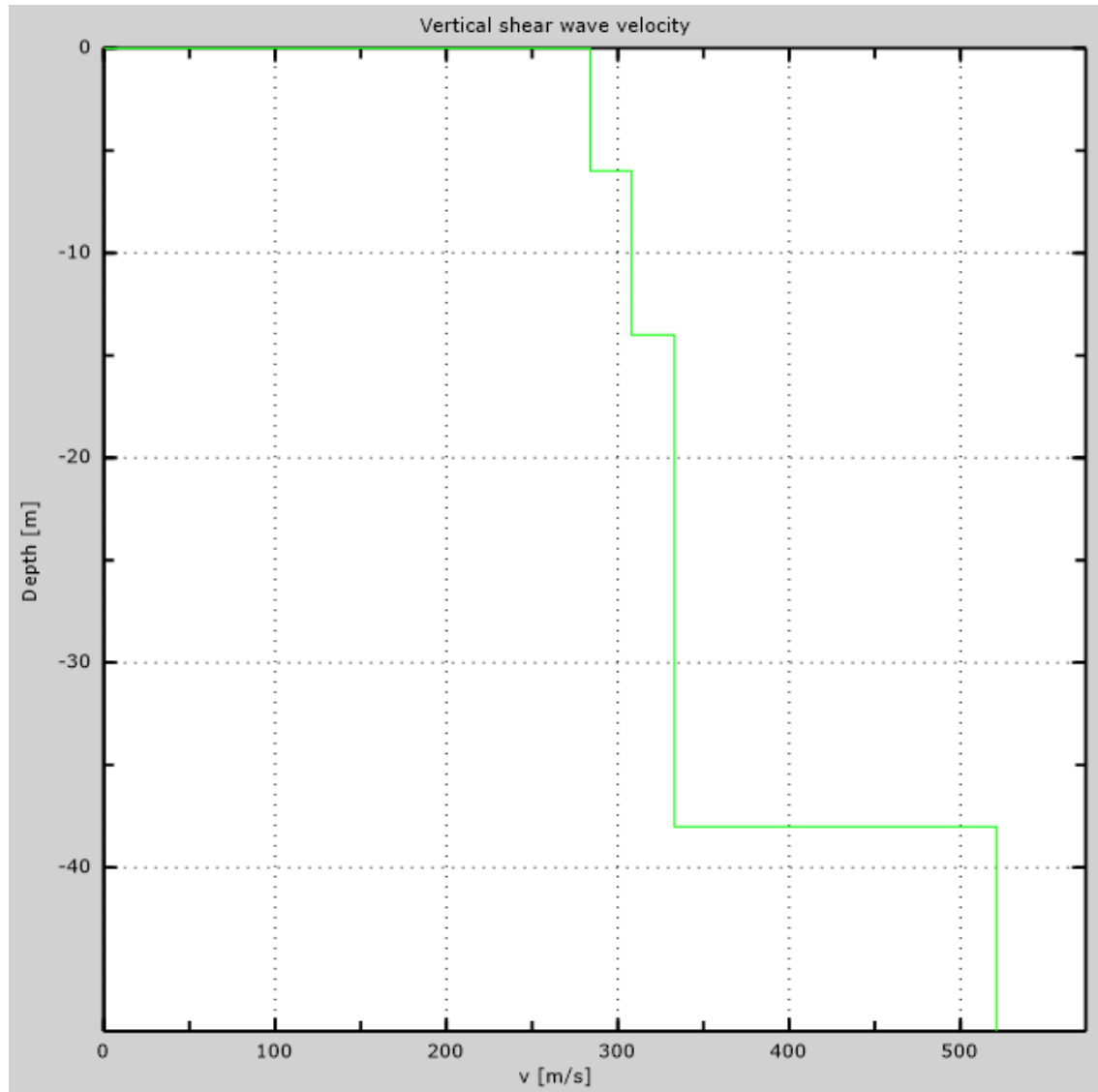


Figure 8: Numerical Vs profile

7 - Final results

Reference plane $z=0$ [m]0

V_{s30} [m/s]315

You are using the definitions included in DM 14 gennaio 2008

The site does belongs to classes A, B, C, D, E or S1 (alluvional soil, gravel, sand, silt, clay, rock).

The site is not susceptible to liquefaction or there is not sensitive clay.

The geotechnic unit 2 is the bed rock

The mechanic characteristics of the layers don't improve improve gradually with depth

Soil type**S**

Appendix

Type of ground

Type A: Rock or other rock-like geological formation, including at most 3 m of weaker material at the surface

Type B: Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least 30 m in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth, V_{s30} between 360 m/s and 800 m/s

Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with thickness greater than 30 m, V_{s30} between 180 m/s and 360 m/s

Type D: Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil with thickness greater than 30 m, V_{s30} lower than 180 m/s

Type E: A soil profile consisting of a surface alluvium layer with v_s values of type C or D and thickness lower than 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s

Type S1: Deposits of soils with $V_{s30} < 100$ m/s (or $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), which include a layer of fine-grained and low consistency soil with a thickness greater than 8 m, or a layer of peat or highly organic clay with a thickness greater than 3 m.

Type S2: Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A - E or S1

B. Registro Fotográfico

Línea 1 (Borrero y Pío Bravo)





Línea 2 (Plaza de San Francisco)





Línea 3 (Colegio Manuel J. Calle)






C. Hojas de Campo


LM1 (Borrero y Pío Bravo): MASW y ReMi.

LM1


Geo & Geo
Geología Geofísica Geotecnología
GEOTECNIA

OPERADOR	B.L.			
NOMBRE DEL PROYECTO	Caracterización De Suelos Centro Histórico.			
UBICACIÓN	Cuenca Gran Colombia y Presidente Borrero			
FECHA	13/11/2015			
HORA DE INICIO	10:55			
LÍNEA GEOFÍSICA	Sísmica <input type="checkbox"/>	Eléctrica <input type="checkbox"/>	Masw <input checked="" type="checkbox"/>	SEV <input type="checkbox"/>
COORDENADA DE INICIO DE LÍNEA	Shot 1 954 Shot 2 955 Shot 3 256 Shot 4 257			
COORDENADA DE FIN DE LÍNEA	Shot 5 258 Shot 6 259 Shot 7 260			
DIRECCIÓN DE LA LÍNEA (EJEM. E-O o N-S)	Este - Oeste.			
ESPACIAMIENTO ENTRE GEÓFONOS/ELECTRODOS	1 m			
NÚMERO TOTAL DE GEÓFONOS/ELECTRODOS	24 Geófonos			
LONGITUD DE LÍNEA	23 mts			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT EXTERNO				
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT 2 INICIAL				
NOMBRE DE ARCHIVO	LACH1			
HORA DE TERMINACIÓN	11:25			
FOTOS: Instalación, equipo, zona de estudio	(616 Fotos ReMi.)			
OBSERVACIONES	Equipo H-1			
ESQUEMA				

LM2 (Borrero y Pío Bravo): MASW y ReMi.



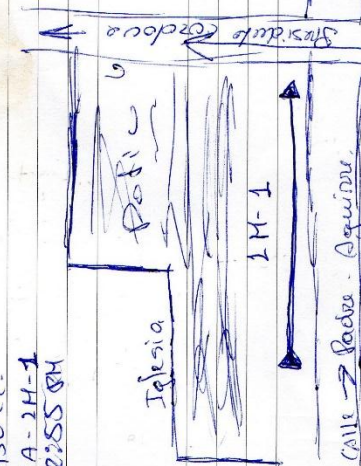
LM2

OPERADOR	B.L.			
NOMBRE DEL PROYECTO	Caracterización de Suelo Centro Histórico			
UBICACIÓN	Cuenca, Calle Presidente Borrero y Río Bravo			
FECHA	13/11/2015			
HORA DE INICIO	12:33			
LÍNEA GEOFÍSICA	Sísmica <input type="checkbox"/>	Eléctrica <input type="checkbox"/>	Masw <input checked="" type="checkbox"/>	SEV <input type="checkbox"/>
COORDENADA DE INICIO DE LÍNEA	Shot 261 Shot 262 Shot 263 Shot 264			
COORDENADA DE FIN DE LÍNEA	Shot 265 Shot 266 Shot 267			
DIRECCIÓN DE LA LÍNEA (EJEM. E-O o N-S)	Oeste - Este			
ESPACIAMIENTO ENTRE GEÓFONOS/ELECTRODOS	1 mt.			
NÚMERO TOTAL DE GEÓFONOS/ELECTRODOS	24			
LONGITUD DE LÍNEA	23 mts.			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT EXTERNO				
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT 2 INICIAL				
NOMBRE DE ARCHIVO	LMCH2			
HORA DE TERMINACIÓN	13:02			
FOTOS: Instalación, equipo, zona de estudio	(6 + 6 Tomas Remi)			
OBSERVACIONES	Geofonos de 9-24 Equipo # 4 Geofonos de 9-24 en arcilla sobre cemento embudo de cava.			
ESQUEMA				

LM1 (Plaza San Francisco): MASW y ReMi.

Geo & Geo
Geología Geofísica Geotécnica
INGENIERIA

LM-1 - Plaza San Francisco

OPERADOR	AL			
NOMBRE DEL PROYECTO	Tesis JUVV. Aules			
UBICACIÓN	Cuenca - Plaza San Francisco			
FECHA	26-11-2015			
HORA DE INICIO	12:20 PM			
LÍNEA GEOFÍSICA	Sísmica <input type="checkbox"/>	Eléctrica <input type="checkbox"/>	Masw <input checked="" type="checkbox"/>	SEV <input type="checkbox"/>
COORDENADA DE INICIO DE LÍNEA	1201 325 2701 326 3701 327 4701 328			
COORDENADA DE FIN DE LÍNEA	5201 329 6201 330 7201 331			
DIRECCIÓN DE LA LÍNEA (EJEM. E-O o N-S)	Sur Oeste - Nor Este.			
ESPACIAMIENTO ENTRE GEÓFONOS/ELECTRODOS	1 mts			
NÚMERO TOTAL DE GEÓFONOS/ELECTRODOS	24 geófonos			
LONGITUD DE LÍNEA	23 mts			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT EXTERNO	10 mts			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT 2 INICIAL	0,5000.			
NOMBRE DE ARCHIVO	TA-2H-1			
HORA DE TERMINACIÓN	12:55 PM			
FOTOS: Instalación, equipo, zona de estudio	 <p style="text-align: right;">6 + 6 = 12.</p> <p style="text-align: right;">Ojo el ultimo 2101 se ubica al otro lado de la calle. pasadizo - Córdova</p>			
OBSERVACIONES	<p>Grupo #1</p> <p>1H-1</p> <p>Calle → Padua - Aguirre.</p>			
ESQUEMA	<p>Una 23 mts 24 geófonos cada metro distancia</p> <p>7 2101 por golpe. cambio</p>			



LM1 (Colegio Manuel J. Calle): MASW y ReMi.

Geo & Geo
Geología Geofísica Geotécnica
GEOTECNIA


LH-1. col. Manuel J. Calle

OPERADOR	A1			
NOMBRE DEL PROYECTO	tesis - GUAN AULES			
UBICACIÓN	Colegio Manuel J. Calle			
FECHA	26-11-2015			
HORA DE INICIO	15:10			
LÍNEA GEOFÍSICA	Sísmica <input type="checkbox"/>	Eléctrica <input type="checkbox"/>	Masw <input checked="" type="checkbox"/>	SEV <input type="checkbox"/>
COORDENADA DE INICIO DE LÍNEA	4° 26' 33" 2° 26' 33" 3° 26' 33" 4° 26' 33"			
COORDENADA DE FIN DE LÍNEA	5° 26' 33" 6° 26' 34" 7° 26' 34"			
DIRECCIÓN DE LA LÍNEA (EJEM. E-O o N-S)	Este - Oeste.			
ESPACIAMIENTO ENTRE GEÓFONOS/ELECTRODOS	1.50 mts			
NÚMERO TOTAL DE GEÓFONOS/ELECTRODOS	24 geofonos			
LONGITUD DE LÍNEA	36 mts			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT EXTERNO	10 mts			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT 2 INICIAL	275 ce.			
NOMBRE DE ARCHIVO	TA-LH-1.			
HORA DE TERMINACIÓN	15:40			
FOTOS: Instalación, equipo, zona de estudio	Tomas Dem 6+6=12.			

OBSERVACIONES	<p>línea 36 mts 24 geofonos cada 1.50 mts 275 con golpe ambo</p> <p>Colegio Manuel J. Calle - Lima</p>
ESQUEMA	

tesis

ESAC (Plaza San Francisco)



Geo & Geo
Geología Geofísica Geotecnología
GEOTECNIA

L-ESAC-1

OPERADOR	AL			
NOMBRE DEL PROYECTO	tesis - Juan Aviles			
UBICACIÓN	Cuenca - Plaza San Francisco			
FECHA	26-11-2015			
HORA DE INICIO	13:03 PM	Sísmica <input type="checkbox"/>	Eléctrica <input type="checkbox"/>	Masw <input type="checkbox"/> SEV <input type="checkbox"/>
LÍNEA GEOFÍSICA				
COORDENADA DE INICIO DE LÍNEA	332 - 333			
COORDENADA DE FIN DE LÍNEA	334			
DIRECCIÓN DE LA LÍNEA (EJEM. E-O o N-S)	L-ESAC-1 Plaza San Francisco			
ESPACIAMIENTO ENTRE GEÓFONOS/ELECTRODOS	3 mts			
NÚMERO TOTAL DE GEÓFONOS/ELECTRODOS	12 geófonos			
LONGITUD DE LÍNEA	36 mts			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT EXTERNO	-			
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT 2 INICIAL	-			
NOMBRE DE ARCHIVO	TA-L-ES-1			
HORA DE TERMINACIÓN	13:30 PM			
FOTOS: Instalación, equipo, zona de estudio	<p>ojo cada linea tuvo geofono 1. termina geofono # 6. 1H-1 se da el pargulo por el geofono # 24 1H-1</p>			

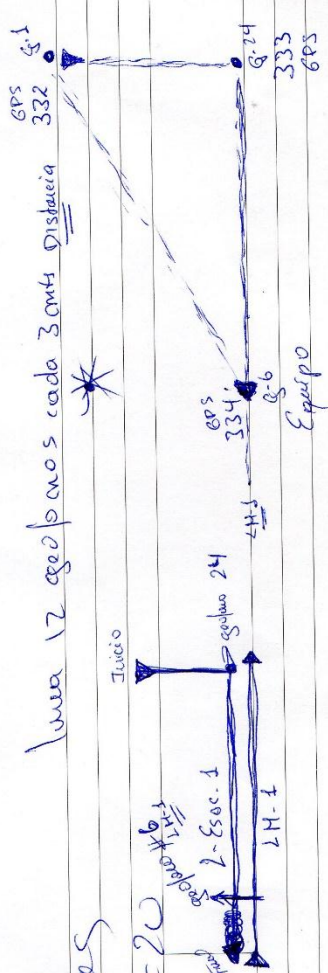
OBSERVACIONES

Línea 12 geofonos cada 3 mts distancia

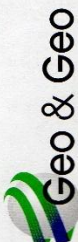
20 fotos

10 + 10 = 20

ESQUEMA




ESAC (Borrero y Pío Bravo)



Geología Geofísica Geotécnica
GEOTINGENIERIA

~~ESAC~~ Esac 2

OPERADOR	B.L.			
NOMBRE DEL PROYECTO	Caracterización de Suelos Centro Histórica			
UBICACIÓN	Cuenca, Calle Presidente Borrero y Pío Bravo			
FECHA	13/11/2015			
HORA DE INICIO	13:13			
LÍNEA GEOFÍSICA	Sísmica <input type="checkbox"/>	Eléctrica <input type="checkbox"/>	Masw <input type="checkbox"/>	SEV <input type="checkbox"/>
COORDENADA DE INICIO DE LÍNEA	268 - 969 - 970.			
COORDENADA DE FIN DE LÍNEA				
DIRECCIÓN DE LA LÍNEA (EJEM. E-O o N-S)				
ESPACIAMIENTO ENTRE GEÓFONOS/ELECTRODOS	2 mts.			
NÚMERO TOTAL DE GEÓFONOS/ELECTRODOS	12 Geófonos			
LONGITUD DE LÍNEA				
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT EXTERNO				
DISTANCIA DEL GEÓFONO 1 A SHOT 2 INICIAL				
NOMBRE DE ARCHIVO	LEC2			
HORA DE TERMINACIÓN	13:37.			
FOTOS: Instalación, equipo, zona de estudio	(10 + 10 Tomos Esac)			
OBSERVACIONES	<p>Grupo #1 Línea cada 2 mts no hay espacio.</p> <div style="text-align: right;">  </div>			
ESQUEMA				

